Actas del XIX CONGRESO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TIG al servicio de los ODS



Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio
Universidad Zaragoza



EDITORES
Juan de la Riva
María Teresa Lamelas
Raquel Montorio
Fernando Pérez-Cabello
Marcos Rodrigues

Zaragoza, 12-14 septiembre 2022

Créditos

© Editores:

Juan de la Riva
María Teresa Lamelas
Raquel Montorio
Fernando Pérez Cabello
Marcos Rodrigues

© De los textos y las imágenes, sus autores

© Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio
Universidad de Zaragoza
C/ Pedro Cerbuna 12. 50.009 Zaragoza

ISBN 978-84-18321-49-8
Año de edición: 2022

Prólogo

El *XIX Congreso de TIG*, continuando la trayectoria bianual iniciada en 1983, aunque con la suspensión en 2020 por la COVID-19, quiere ser un ámbito de encuentro y discusión multidisciplinar entre científicos, profesionales, instituciones y empresas que hacen uso de la información geográfica. Una ocasión única para compartir los avances logrados, discutir los problemas encontrados, abrir nuevas vías de trabajo, establecer contactos fructíferos...

La *Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible*, con sus 17 objetivos, sus 169 metas y sus más de 230 indicadores, es quizás el proyecto comunitario más audaz y ambicioso al que la sociedad se enfrenta actualmente.

Las TIG ofrecen herramientas de representación, análisis, integración, comprensión, proyección y modelado de la realidad espacial o geográfica. Las TIG, al igual que todas las partes interesadas, están llamadas a contribuir a la consecución de la nueva Agenda y a colaborar en el proceso de seguimiento de los progresos conseguidos en el cumplimiento de los *Objetivos de Desarrollo Sostenible* (ODS) y las metas, aportando información y sistematizando indicadores transversales para su evaluación.

Bajo el lema “TIG al servicio de los ODS”, con nuestro Congreso queremos contribuir a la consecución de los ODS 2030, evidenciando la potencialidad de las geotecnologías e identificando los objetivos y los indicadores a los que colabora la actividad de la comunidad TIG para transformar el contexto económico, social y ambiental hacia un futuro más sostenible en todas las escalas, a nivel global, regional y local.

La capacidad y los medios de computación junto a la disponibilidad y accesibilidad a la información han cambiado radicalmente durante la última década. Las comunidades de usuarios y analistas geoespaciales están entrando en una nueva era en la que las TIG están cobrando vida, conectándonos a través de la web y profundizando en la dimensión social. Con el auge de la computación en la nube y la revolución móvil/app, la comunidad TIG se está expandiendo rápidamente hasta incluir a casi todos los habitantes del planeta. La información espacial se está reuniendo virtualmente dando lugar a renovadas y mejoradas representaciones del territorio.

En resumen, las TIG, tanto por su capacidad de integración como por su transversalidad disciplinar y su potencial de difusión del conocimiento espacial, jugarán un papel fundamental hacia la consecución de los ODS.

Organizado desde el seno de la Comunidad Geográfica, este Congreso está plenamente abierto a todos los profesionales e investigadores de cualquier ámbito –Ciencias Sociales, Ciencias de la Tierra, Ingenierías, Cartografía…– que tienen en común el uso de las TIG (Sistemas de Información Geográfica, Teledetección, Tratamiento de datos...) para el diagnóstico, el modelado, la visualización y la planificación territorial.

En nombre del Comité Organizador y de la Junta Directiva del Grupo de TIG de la AGE, te invitamos a colaborar con tu conocimiento y tu experiencia a este *XIX Congreso de TIG* mediante contribuciones orales y pósteres, en torno a un amplio espectro de líneas temáticas.

Juan de la Riva Fernández
Presidente del Comité Organizador

Ana Nieto Masot
Presidenta del Grupo de TIG de la AGE

Relación entre las Líneas Temáticas del Congreso y los ODS

Marcos Rodrigues y Juan de la Riva



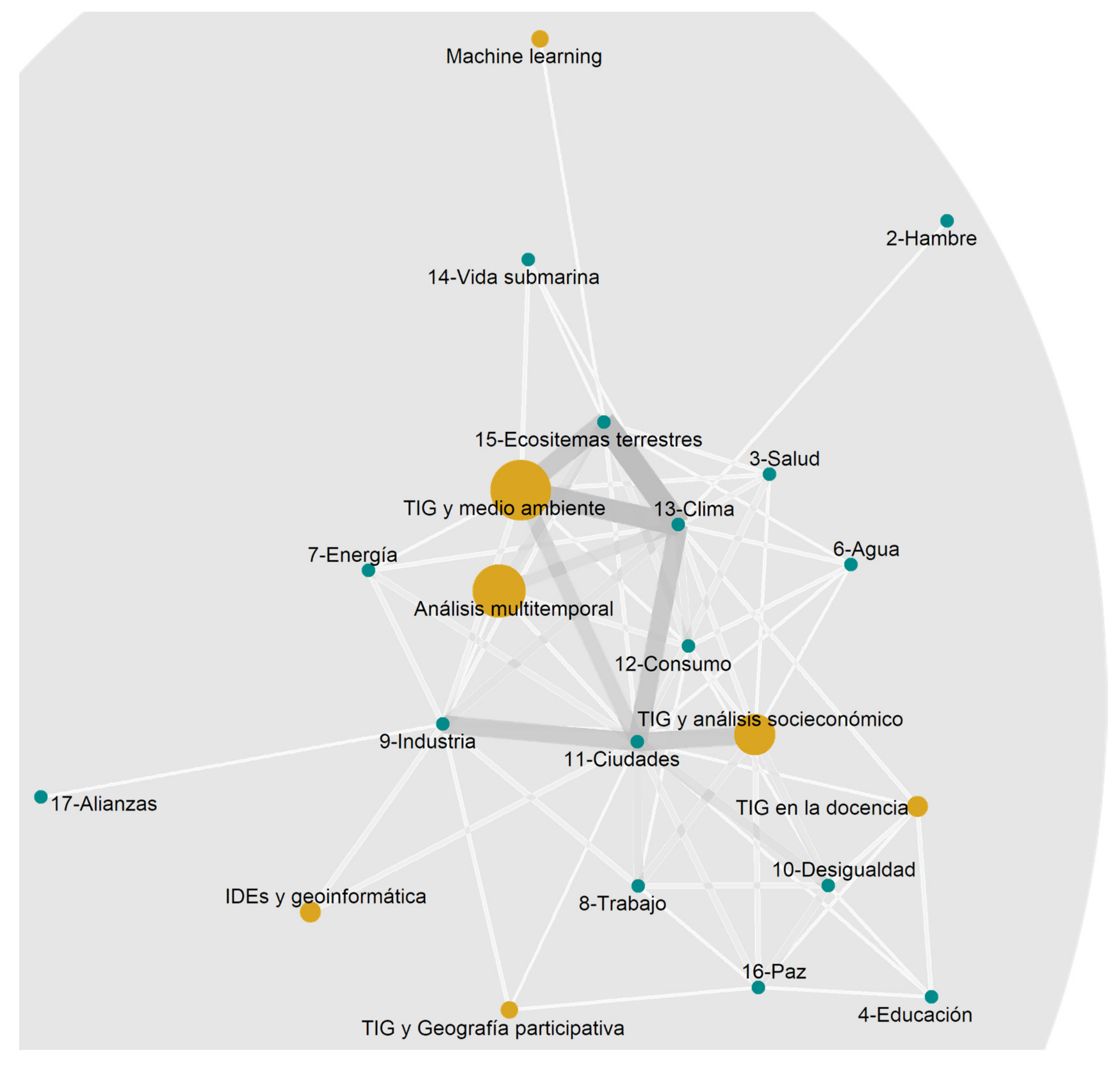
Títulos



Palabras clave

Las nubes de palabras recopilan la frecuencia de aparición de términos en el título (en rojo) y palabras clave (en azul) de las comunicaciones presentadas.

En el gráfico inferior, los puntos amarillos indican las diferentes líneas temáticas; los verdes los ODS. El tamaño de los puntos amarillos se relaciona con la frecuencia con que una línea es abordada por una comunicación. Las líneas y su grosor relacionan los ODS con las líneas temáticas, de nuevo con mayor frecuencia cuanto mayor es el grosor.



Índice general

COMITÉS DEL *XIX CONGRESO DE TIG*

TIG Y GEOGRAFÍA PARTICIPATIVA

Cartografía colaborativa, crowdsourcing, cartografía web… / Ciencia ciudadana, información voluntaria, SIG de participación pública…

APLICACIONES Y DESARROLLOS BASADOS EN TIG (SIG, TELEDETECCIÓN, CARTOGRAFÍA Y OTRAS GEOTECNOLOGÍAS)

TIG y medio ambiente: evaluación ambiental, riesgos, planificación física, ordenación del territorio…

TIG y análisis socioeconómico: variables sociodemográficas y económicas, urbanismo, ordenación del territorio, geomarketing, location intelligence, Internet de las cosas (IoT)…

Infraestructuras de Datos Espaciales, desarrollos geoinformáticos, aplicaciones en la nube…

TIG en la docencia y en la divulgación del conocimiento geográfico

Comité Organizador

Juan de la Riva Fernández - Presidente del Comité Organizador. Profesor Titular de Análisis Geográfico Regional, Universidad de Zaragoza.

Marcos Rodrigues Mimbrero - Coordinador General del Congreso y del Programa. Profesor Ayudante Doctor de Análisis Geográfico Regional, Universidad de Zaragoza.

Alberto García-Martín - Coordinador de actividades formativas y talleres. Profesor Contratado Doctor de SIG y teledetección, Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza.

Raúl Hoffrén Mansoa - Coordinador de actividades con jóvenes titulados en TIG. Contratado Predoctoral FPU, Análisis Geográfico Regional, Universidad de Zaragoza.

Teresa Lamelas Gracia - Coordinación del Comité Científico. Profesora Contratada Doctora de SIG y teledetección, Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza.

Luis Alberto Longares Aladrén - Comité científico, Profesor Titular de Geografía Física, Universidad de Zaragoza.

Antonio Montealegre Gracia - Coordinación del personal de apoyo a la organización. Profesor Ayudante Doctor de SIG y Teledetección, Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza.

Raquel Montorio Llovería - Coordinación del Comité Científico. Profesora Contratada Doctora de Análisis Geográfico Regional, Universidad de Zaragoza.

Fernando Pérez Cabello - Coordinación del Comité Científico. Profesor Titular de Análisis Geográfico Regional, Universidad de Zaragoza.

Estela Pérez Cardiel - Coordinadora de actividades con jóvenes titulados en TIG. Contratada Predoctoral FPU, Análisis Geográfico Regional, Universidad de Zaragoza.

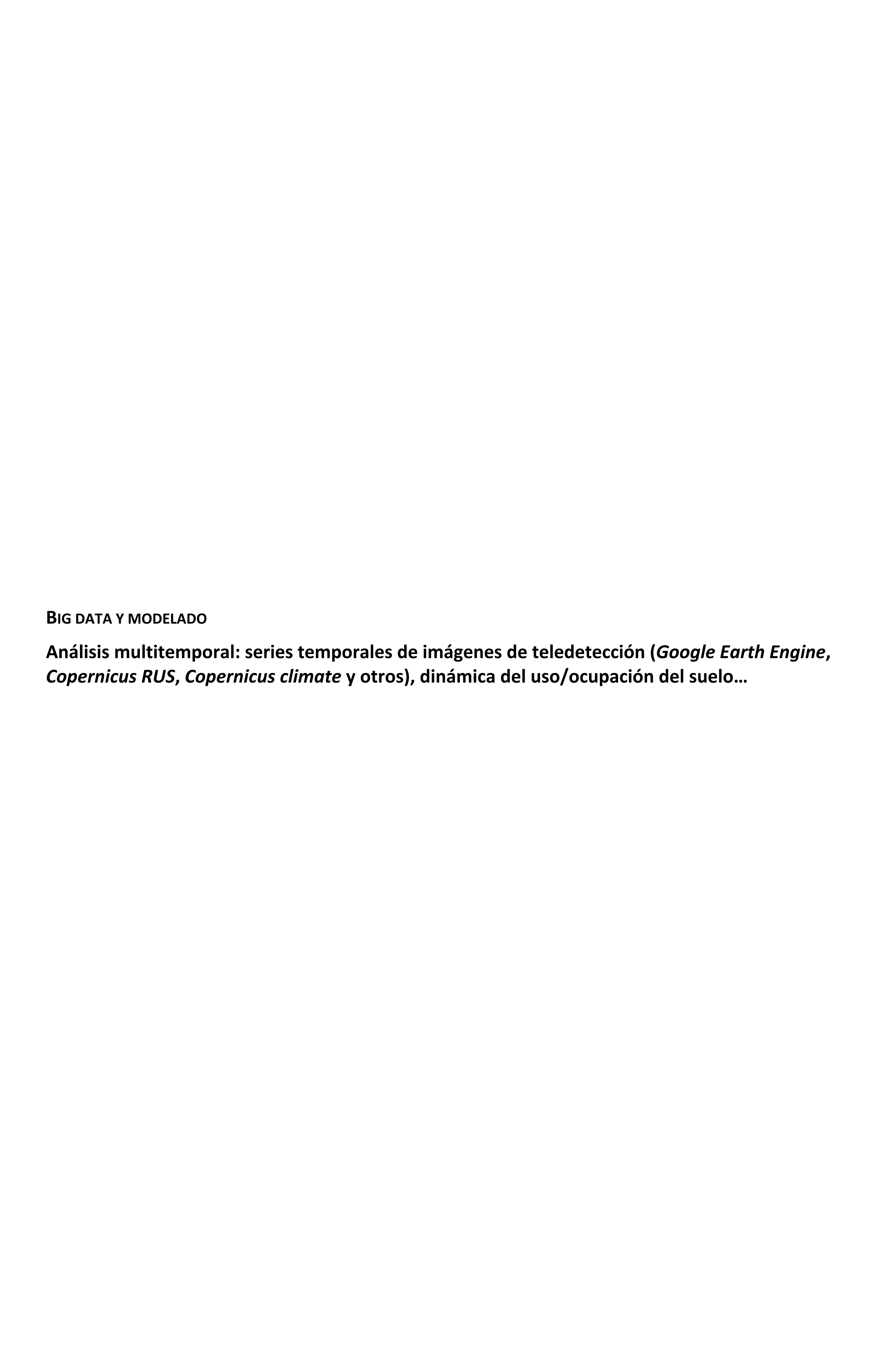
Miguel Sevilla Callejo - Coordinador de actividades formativas y talleres. Mapeado colaborativo Geoinquietos Zaragoza y Asociación QGIS España.

María Zúñiga Antón - Relaciones institucionales. Profesora Contratada Doctora de Geografía Humana, Universidad de Zaragoza.

Fco. Javier Zarazaga Soria - Comité científico, Profesor Titular de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Universidad de Zaragoza.

Comité Científico

Teresa Lamelas Gracia - Coordinación del Comité Científico, CUD Zaragoza.
Fernando Pérez Cabello - Coordinación del Comité Científico, Universidad de Zaragoza.
Raquel Montorio Llovería - Coordinación del Comité Científico, Universidad de Zaragoza.
Inmaculada Aguado Suárez - Universidad de Alcalá.
Francisco Alonso Sarriá - Universidad de Murcia.
Joaquín Bosque Sendra - Universidad de Alcalá.
María Teresa Camacho Olmedo - Universidad de Granada.
Emilio Chuvieco Salinero - Universidad de Alcalá.
David Cocero Matesanz - Universidad Nacional de Educación a Distancia.
Carmelo Conesa García - Universidad de Murcia.
Francisco Javier Escobar Martínez - Universidad de Alcalá.
Severino Escolano Utrilla - Universidad de Zaragoza.
Samuel Esteban Rodríguez - Universidad de Zaragoza.
Federico Benjamín Galacho Jiménez - Vocal Grupo de TIG de la AGE, Universidad de Málaga.
Mariano García Alonso - Universidad de Alcalá.
Juan Carlos García Palomares - Universidad Complutense de Madrid.
Montserrat Gómez Delgado - Universidad de Alcalá.
Javier Gutiérrez Puebla - Universidad Complutense de Madrid.
Luis Hernández Calvento - Universidad de Palmas de Gran Canaria.
Luis Alberto Longares Aladrén - Universidad de Zaragoza.
María José López García - Vocal-Vicepresidenta Grupo de TIG de la AGE, Universidad de Valencia.
Pilar Martín Isabel - CCHS, CSIC.
Antonio Moreno Jiménez - Universidad Autónoma de Madrid.
Ana Nieto Masot - Presidenta del Grupo de TIG (AGE), Universidad de Extremadura.
Fco. Javier Nogueras Iso - Universidad de Zaragoza.
José Ojeda Zújar - Universidad de Sevilla.
Xavier Pons Fernández - Universitat Autònoma de Barcelona.
Raúl Postigo Vidal - Escuela Universitaria de Turismo de Zaragoza.
Alfredo Ramón Morte - Vocal Grupo de TIG de la AGE, Universidad de Alicante.
Javier Salas Rey - Universidad de Alcalá.
José Manuel Sánchez Martín - Universidad de Extremadura.
Miguel Ángel Saz Sánchez - Universidad de Zaragoza.
Ismael Vallejo Villalta - Vocal-Secretario-Tesorero Grupo de TIG (AGE), Universidad de Sevilla.
Javier Zarazaga Soria - Universidad de Zaragoza.
Benito Zaragozí Zaragozí - Universitat Rovira i Virgili.



BIG DATA Y MODELADO

Análisis multitemporal: series temporales de imágenes de teledetección (*Google Earth Engine*, *Copernicus RUS*, *Copernicus climate* y otros), dinámica del uso/ocupación del suelo…



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 2-11

Persistencia de la cubierta de nieve en los glaciares pirenaicos y análisis de productos satélite

R. Aransay[1,2], J. Revuelto[3], Á. Gómez-Gutiérrez[1], J. García[3], I. Vidaller[3], A. Nieto[1], F. Rojas-Heredia[3], E. Izagirre[3], J.I. López-Moreno[3]

[1] *Departamento de Arte y Ciencias del Territorio, Universidad de Extremadura. Av. Universidad s/n, 10003 Cáceres.*
[2] *IBER Sostenibilidad y Desarrollo. Av. de la Cdad. de Soria, 8, 50003 Zaragoza.*
[3]*Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC. Av. Montañana, 1070C, 50820 Zaragoza.*

raquel_aran@hotmail.es, jrevuelto@ipe.csic.es,alvgo@unex.es, jorgarji@gmail.com, ixeia@ipe.csic.es, ananieto@unex.es, frojash@ipe.csic.es, enaut.izagirre@ehu.eus, nlopez@ipe.csic.es

RESUMEN: El manto de nieve es un elemento importante en el Pirineo, especialmente en invierno y primavera, ya que cubre grandes extensiones de este sistema montañoso y por ello controlando múltiples procesos ambientales. En particular, la evolución de los glaciares en el Pirineo está ligada a las cantidades de nieve acumuladas y su dinámica espacio-temporal.
Este trabajo presenta una evaluación de las plataformas satélite disponibles en el rango óptico de alta resolución espacial para observar la cubierta de nieve sobre los glaciares Pireniacos. En particular se han procesado imágenes de los sensores Sentinel-2 (Theia-Snow y Google Earth Engine) y RapidEye en el periodo común de dichas plataformas (2017-2021) en los meses que muestran el máximo y el mínimo de acumulación de nieve (marzo-octubre). Además, para fechas concretas se evaluó el error de las cartografías de cobertura de nieve obtenidas con cada satélite con cartografías obtenidas con drone.
Dada la baja resolución temporal de las observaciones de la superficie de los glaciares y debido a las limitaciones inherentes a las observaciones en el rango óptico (nubes), no se han podido obtener conclusiones climáticas sólidas. Sin embargo, esta información abre una nueva línea de observación de la evolución los glaciares que permitirá conocer la extensión mínima de la cobertura de nieve y cuándo se ha producido, ayudando así a conocer mejor la dinámica de estos elementos tan representativos del Pirineo.

Palabras-clave: manto nival, glaciar, Pirineos, imágenes de satélite.

1. INTRODUCCIÓN

La acumulación de nieve es un factor de suma importancia en la cordillera de los Pirineos, especialmente en la vertiente sur. Muchas características de los regímenes fluviales están relacionadas con la retención de nieve invernal y el deshielo primaveral (García-Ruiz et al., 2001). Además, la nieve controla diversos procesos de la alta montaña Pirenaica como la erosión y los ciclos fenológicos (Pomeroy y Gray, 1995), así como se asocia a la ocurrencia de riesgos naturales, como los aludes o fuertes eventos de fusión relacionados con crecidas destacables de los caudales de los ríos (Barnett et al., 2005).

Por otro lado, la evolución de uno de los elementos del paisaje Pirenaico más característico como son los glaciares es fuertemente dependiente del manto de nieve (López Moreno, 2005).

Los años de fuertes acumulaciones de nieve suelen estar ligados no solo a una potencial ganancia de masa glaciar durante el periodo de acumulación, sino que, además, la cobertura de nieve ejerce una acción protectora del hielo durante la época más cálida del año, preservándolo de la radiación solar así como de fuertes incrementos térmicos. Conocer la extensión de la cobertura de nieve y cómo la misma va retrocediendo en la superficie de los glaciares a lo largo del verano e inicio del otoño, puede permitir mejorar la comprensión de los procesos que controlan la evolución de los glaciares (Braithwaite y Hughes 2020).

En la última década se ha constatado que el ritmo de retroceso de estos glaciares continúa siendo muy elevado (Vidaller et al., 2021), por lo que ahondar en la comprensión de los procesos que controlan su

evolución es muy importante. El aumento de la temperatura del aire durante el periodo de fusión es la principal causa del reciente declive de los glaciares en el Pirineo español (sur) (Chueca et al., 2005), ya que la fusión de la nieve lo que provoca es que el hielo de los glaciares quede descubierto y expuesto a la radiación solar directa y a los efectos por las altas temperaturas de los meses de verano (López Moreno et al., 2016). La mayoría de los glaciares en todo el mundo han experimentado un retroceso intenso desde la culminación de la Pequeña Edad de Hielo (LIA, del inglés Little Ice Age), a mediados del siglo XIX (Marshall, 2014). Esta tendencia aparentemente se ha acelerado en las últimas tres décadas (Serrano et al., 2011). Varios estudios han examinado este fenómeno en Europa, como es el caso de los Alpes, donde se ha observado un aceleramiento de la contracción de los glaciares desde 1960, acentuándose a partir de la década de los 2000 (Gardent et al., 2014).

De cara a observar la evolución de los glaciares en la actualidad, tienen gran relevancia la monitorización de la duración y la extensión de la capa de nieve que alimenta y protege los glaciares. Sin embargo, la monitorización de esta debe realizarse con una resolución temporal y espacial suficiente que permita de este modo observar las fluctuaciones de la superficie cubierta por nieve.

Las propiedades ópticas de la nieve son únicas en comparación con las de otros elementos del paisaje de montaña (rocas, suelo, masas forestales…), principalmente debido a la alta reflectancia de la nieve en el espectro visible (VIS; 400–800 nm) y la disminución de la reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR; 800–1000 nm) e infrarrojo de onda corta (SWIR; 1000–2500 nm) (Masson et al., 2018). La monitorización de la capa de nieve en regiones montañosas depende de dichas resoluciones, ya que en este tipo de espacios nos encontramos con limitaciones debido a la cobertura de nubes y a los rápidos cambios en la extensión de la nieve (Hall et al., 1995, Masson et al., 2018). Partiendo de la base que la observación de la superficie cubierta por el manto de nieve hay que hacerla en el espectro óptico (Hall et al., 1995), en este trabajo se pretende analizar diferentes plataformas satélite disponibles en la actualidad que operan en dicho rango.

Este trabajo tiene como principal objetivo determinar la evolución de la cobertura de nieve observada en distintos glaciares del Pirineo, seleccionados en función de su tamaño y localización en esta cordillera. La evolución de fracción de la superficie cubierta por nieve en el periodo de fusión, así como la extensión mínima que alcanza y la fecha en la que se alcanza, servirán como indicador de cara a determinar la vulnerabilidad de los glaciares a la pérdida de masa. Así pues, el objetivo final será conocer la fecha en la que se da el mínimo y cuál es el % de área cubierta de nieve, así como determinar la fuente de información (sensor satélite) más apropiada para caracterizar la dinámica de la cobertura de nieve de alta resolución espacio-temporal y evaluar distintos indicadores/variables para caracterizar la superficie cubierta por nieve.

Para ello, se ha comparado las observaciones de satélites ópticos de alta resolución espacial (Sentinel-2 y RapidEye) con adquisciones de UAV en algunos glaciares del Pirineo. Durante el periodo con observaciones comunes de estas plataformas (2017-2022), se ha comparado la información obtenida para así reconstruir la evolución temporal sobre los galaciares.

2. ZONA DE ESTUDIO

El análisis se centra en los glaciares del Pirineo, los cuales se encuentran a partir de los 2.700 m, únicamente en los macizos centrales, y en la mayoría de ellos sólo se conserva la cubeta localizada en el circo glaciar debido a factores como la topografía, la morfología y la altura.

El clima del Pirineo se puede definir como mediterráneo de alta montaña. La mayor parte de la acumulación de nieve se produce entre noviembre y mayo, y la ablación entre junio y septiembre (López-Moreno et al., 2016). Para situarnos en el contexto climático del entorno cabe destacar que la elevación media anual estimada de la isoterma de 0°C oscila entre 2700 m y 3000 m (Jomelli et al., 2020). En las cotas más altas la precipitación media anual supera los 2000mm, siendo el invierno y la primavera las estaciones más húmedas (Buisan et al., 2015). En el periodo 1983–2013 se observaron aumentos de temperatura estadísticamente significativos en mayo y junio, y disminuciones estadísticamente significativas en noviembre y diciembre, lo cual afecta a la acumulación y ablación de hielo (López-Moreno et al., 2016).

Los glaciares analizados en este estudio son: Infiernos, Ossoue, Monte Perdido, Llardana, La Paul, Maladeta y Aneto (Tabla 1, Figura 1).

Esta selección de glaciares resulta representativa de la heterogeneidad de estos elementos en el Pirineo, ya que cubren distintas zonas de la cordillera además de tener superficies y exposiciones contrastadas.

Tabla 1. Características de los glaciares seleccionados para el análisis. Valores de la altitud de la cumbre dominante y orientación obtenidos en Rico Lozano, I. I. 2019.

GLACIAR	*CUMBRE DOMINANTE (m)*	*EXTENSIÓN 2020 (ha)*	*ORIENTACIÓN*
Aneto	3.404	47,35	N-NE
Infiernos	3.081	4,35	N
Llardana	3.371	7,55	NO
Maladeta	3.312	25,1	N-NE
Monte Perdido	3.355	30	N-NE
La Paul	3.371	4,9	N-NE
Ossue	3.298	26,6	E

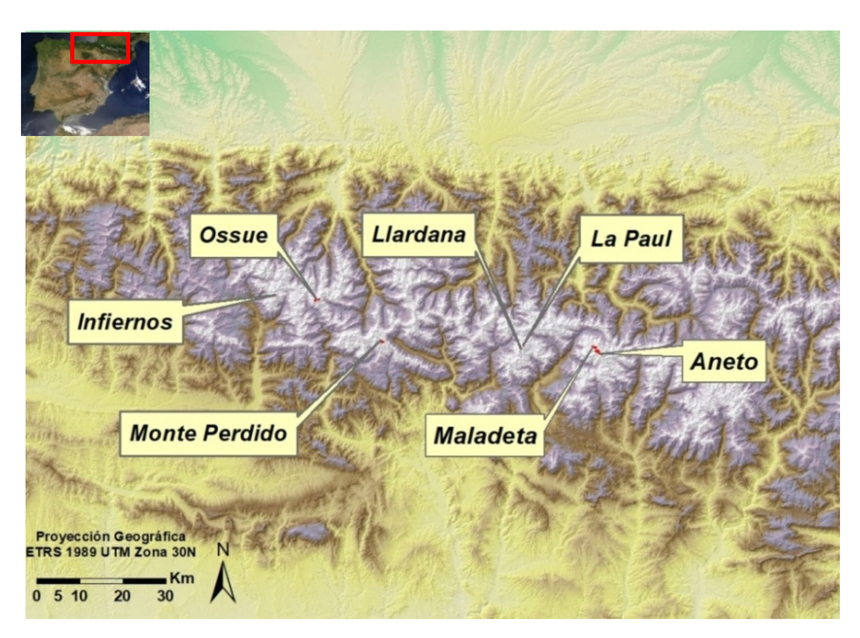


Figura 1. Glaciares del Pirineo seleccionados para el análisis y España vista desde el espacio, 19 de Junio 2003. Fuente: MODIS. Elaboración propia.

3. ANÁLISIS DE LAS PLATAFORMAS SATÉLITE Y METODOLOGÍA

Las imágenes obtenidas para la realización del trabajo provienen de distintos organismos: por un lado se han recopilado ortofotos procesadas de las imágenes aéreas de los glaciares tomadas entre finales de agosto y principios de septiembre del año 2020 a partir de imágenes aéreas obtenidas por un UAV, proporcionadas por el Instituto Pirenaico de Ecología (IPE); y por otro lado se han obtenido imágenes de diferentes satélites, escogidos tras un proceso de selección en base a las necesidades del estudio.

Las imágenes con la información de elevación de la superficie glaciar proporcionadas por el IPE se obtuvieron en el año 2020 con tres UAV diferentes: dos UAV de ala fija (SenseFly eBee-Plus y eBee-X) y un UAV DJI Mavic Pro 2. Este proceso se llevó a cabo en varias campañas de campo entre finales de agosto y principios de octubre. Las superposiciones de las imágenes del UAV permitieron generar densas nubes de puntos 3D de las áreas de estudio utilizando el algoritmo Structure from Motion (SfM) (Forlani et al, 2018).

Se ha seleccionado qué satélite o satélites se van a utilizar para la búsqueda de imágenes. La observación de la superficie cubierta por el manto de nieve hay que hacerla en el espectro óptico (Hall et al, 1995), po lo que se analiza la resolución espacial, la frecuencia de la toma de imágenes y la fecha de lanzamiento y disponibilidad de observaciones. La resolución espacial nos indicará con qué grado de detalle se va a obtener información de la zona de estudio. La frecuencia de la toma de imágenes nos servirá para saber cuánto tiempo pasa entre una imagen disponible y la siguiente. La fecha de disponibilidad nos indicará cuanto tiempo es posible retroceder en las observaciones. Los sensores que se han evaluado se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de los satélites seleccionados. Elaboración propia.

SATÉLITE	*RESOLUCIÓN*	*FRECUENCIA*	*FECHA DISPONIBLE*
Sentinel 2	10 m, 20 m, 60 m	5 días	2015
Landsat 8	30 m	16 días	2013
Spot 6 y 7	6 m	6 días	2012-2014
RapidEye	5 m	diaria	2009
Aster	15 m, 30 m, 90 m	16 días	1999

Con esta información se valoran las posibilidades que presenta cada satélite, en base a los siguientes factores que debemos tener en cuenta para realizar el análisis: el periodo de estudio estará comprendido entre 5-10 años, del cual buscaremos el mayor número de imágenes entre marzo y octubre con total ausencia de nubes en la superficie de los glaciares. En base a esta búsqueda de sensores se decide escoger el satélite Sentinel-2, el cual contiene 13 bandas del espectro electromagnético, obtenidas a partir de una configuración de doble satélite (Sentinel 2A y 2B), que representa una frecuencia temporal de 5 días, y proporciona la extensión de la capa de nieve de las bandas visible e infrarroja cercana con una resolución espacial de 20 m. Estas características de Sentinel-2 han impulsado el monitoreo de alta resolución espacial de la capa de nieve en áreas montañosas en los últimos años (Gascoin et al, 2019, Revuelto et al, 2021). El inconveniente que encontramos es que no permite realizar análisis climáticos que requieran de un periodo de observación largo, ya que las imágenes están disponibles a partir de finales de 2015. Además, el tiempo de revisita de 5 días sigue siendo una limitación en áreas fuertemente afectadas por la presencia de nubes. A partir de Sentinel-2 se obtienen y procesan las imágenes de dos maneras diferentes: con Theia Snow Collection (Gascoin et al., 2019) y Google Earth Engine, con un algoritmo de detección basado en el NDSI (Dozier, 1989).

De cara a tratar de extender en el tiempo las observaciones, para algunos glaciares se han analizado imágenes RapidEye, que además permiten extender hasta 2009 el periodo de estudio. Las imágenes obtenidas permitirán contrastar las observaciones. RapidEye es una constelación de cinco satélites idénticos, localizados en el mismo plano orbital y calibrados por igual entre sí, propiedad y operados por Planet, y lanzado el 29 de agosto de 2008. Estos sensores tienen imágenes en cinco bandas espectrales (Blue, Green, Red, Red Edge y Near-Infrared), con una resolución de 5 m, y una frecuencia temporal diaria.

Otras plataformas de satélite han sido descartadas debido a su baja frecuencia temporal que, sumadas a las limitaciones asociadas a la recurrente presencia de nubes, limitan notablemente la generación de observaciones en la zona de interés.

La metodología propuesta consistirá en analizar la cobertura de nieve a través de la combinación de distintas bandas espectrales de las imágenes satélite mediante índices de presencia de nieve, como el Índice Diferencial de Nieve Normalizado o NDSI (Dozier, 1989). El NDSI combina la Banda 2 – Green (Parte visible Verde del espectro: 0.53-0.61 nm) con la Banda 5 – SWIR (Infrarrojo de Onda Corta: 1.55-1.75 nm) (Eq. 1):

$$NDSI = TMBand2 - TMBand5 \; / \; TMBand2 - TMBand5 \quad (1)$$

De esta información se derivará la superficie cubierta por nieve de los glaciares y posteriormente se caracterizará la evolución temporal de dicha cubierta entre el máximo y el mínimo anual de acumulación de nieve (marzo-octubre), para determinar así el minimo anual aboluto y el momento en el que se produce.

Para realizar este análisis se han llevado a cabo varios métodos que permiten clasificar las imágenes de los sensores Sentinel-2 y RapidEye. Inicialmente se empleó Theia Snow Collection (Gascoin et al., 2019), producto del cual se extrajeron las imágenes Sentinel-2 clasificadas según los píxeles considerados nieve/no nieve. Tras observar los resultados y considerarlos incoherentes se decidió prescindir de este producto. Por ello, para el procesado de imágenes Sentinel-2 se decidió optar por la plataforma Google Earth Engine (sección 3.1). Para el procesado de imágenes RapidEye se optó por una metodología particularizada, según las características radiométricas de cada imagen (sección 3.2).

3.1. Procesado de imágenes Sentinel-2 con Google Earth Engine

La plataforma Google Earth Engine contiene un visor de datos de imágenes geoespaciales con acceso a información tanto a nivel regional como global. Además, permite elaborar scripts (en Java) que posibilitan

visualizar y crear capas de datos para observar ciertos cambios en el tiempo o características espaciales de un momento determinado (Mutanga y Kumar, 2020).

Se va a clasificar la información de las imágenes Sentinel-2 en zonas cubiertas o no de nieve en la superficie de los glaciares. La obtención de la máscara de hielo (en adelante “Ice mask”) se ha basado en un condicional doble a partir de los valores del umbral en el NDSI y en el NIR. Dadas las diferencias de albedo en la signatura espectral de la nieve y el resto de elementos (ver figura 2) presentes en las inmediaciones de los glaciares (rocas, suelo desnudo y hielo), se ha establecido la siguiente clasificación para la nieve: píxeles en los que tanto el valor del NIR y NDSI sea superior a 0.4, son clasificados como nieve. El resto es clasificado como “No nieve” y, por tanto, las zonas interiores a los límites de los glaciares son consideradas como hielo y/o detritos de roca indistintamente.

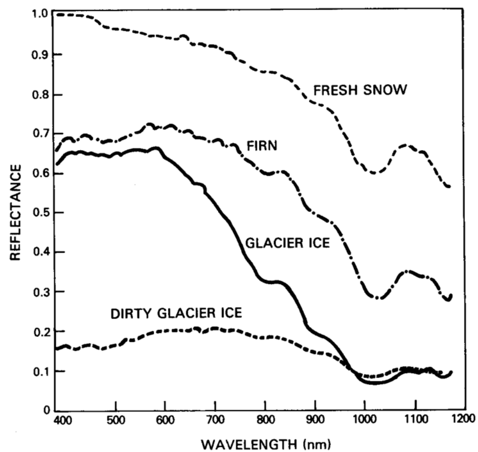


Figura 2. Espectros de reflectancia para distintas superficies de nieve y hielo. Fuente: Maurer, 2002.

3.2. Procesado de imágenesRapidEye

La clasificación de zonas cubiertas o no por nieve, observadas con ímágenes RapidEye, se realizó en base a una única banda. Para este análisis particularizado a las características radiométricas de cada imagen, y teniendo en cuenta el espectro de reflectancia para la nieve (Figura 3.1), se escogen la banda 1 que muestra los valores del azul (440 – 510 nm) y la banda 5 que muestra los valores del ifrarrojo (760 – 850 nm), y se realiza una clasificación según los valores de nieve que se observan en cada imagen. Para ello, en primer lugar, se realiza una primera visualización de los valores de la banda 5 para varios puntos diferentes, tanto en zonas de hielo como en zonas de nieve.

Para cada fecha, se extrajo con el límite de los glaciares observado en 2020 (Vidaller et al., 2021) la banda 5 de las imágenes RapidEye. Posteriormente, y una vez seleccionado el umbral para clasificar nieve /no nieve en la zona de estudio, se binarizan los píxeles (ver ejemplo de este procesaimento en la figura 3). Al ser esta plataforma una plataforma de pago, tan solo se adquirieron imágenes para los tres galciares de menor extensión y más confinados en los circos glaciares de este estudio (Infiernos, Llardana y La Paul). En ellos, el disponer de imágenes de elevada resolución espacial es más interesante.

Imagen RapidEye → (B1- **3** *B5) /(B1+**3***B5) → Con("Band_5">**3000**,Con(NDSI <**-0.60**,1,0),0)

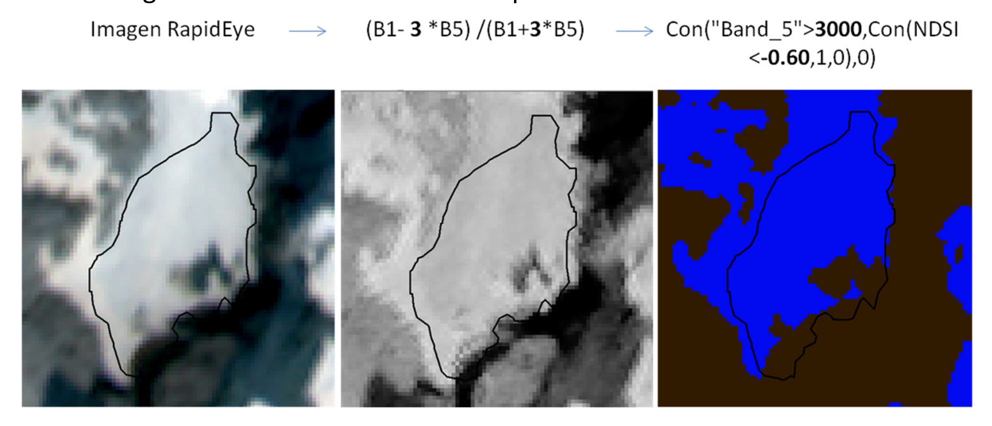


Figura 3. Ejemplo del procesado de imágenes RapidEye (Infiernos 26/07/2016). De izquierda a derecha: RGB, procesamiento de la banda 1 y la banda 5, clasificación de los valores de la banda procesada. Elaboración propia.

4. RESULTADOS

4.1. Evaluación de las coberturas de nieve obtenidas con los diferentes productos

4.1.1. Evolución temporal de glaciares por Sentinel-2 (Ice mask)

Los resultados que se han obtenido (ejemplo 2017: Figura 4, ejemplo 2021: Figura 5) muestran una tendencia similar: los glaciares están cubiertos de nieve al comienzo del periodo de estudio (primavera), y es a partir de mayo-junio cuando empieza a descender la cubierta de nieve hasta el valor en septiembre-octubre. Con la llegada del otoño, en septiembre, los glaciares se vuelven a cubrir poco a poco de nieve. Sin embargo, la evolución temporal de la fracción cubierta por nieve no muestra en la mayoría de los casos esta evolución, ya que este aumento es progresivo a lo largo del otoño y el invierno. Por ello, aun habiendo hecho un procesamiento de selección de imágenes que aparentemente se han considerado óptimas, es más acertado comparar los resultados obtenidos con otras plataformas para asegurarnos de obtener información fiable.

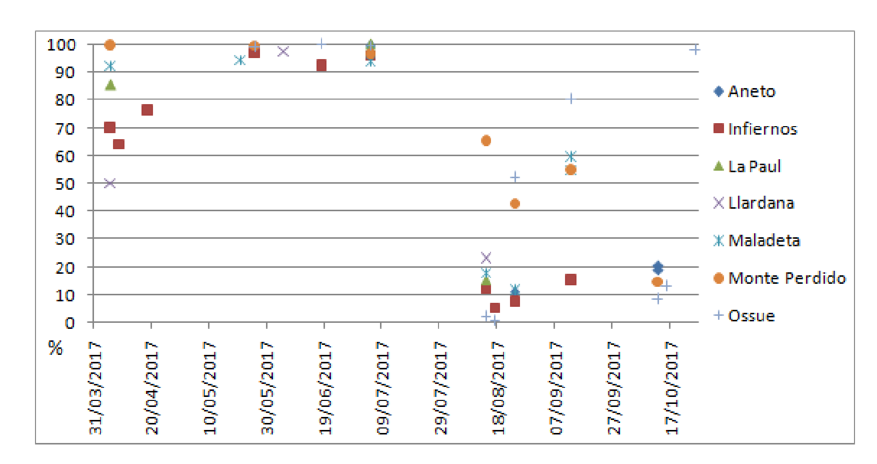


Figura 4. Evolución de la serie Ice mask de Sentinel-2 en el año 2017. Elaboración propia.

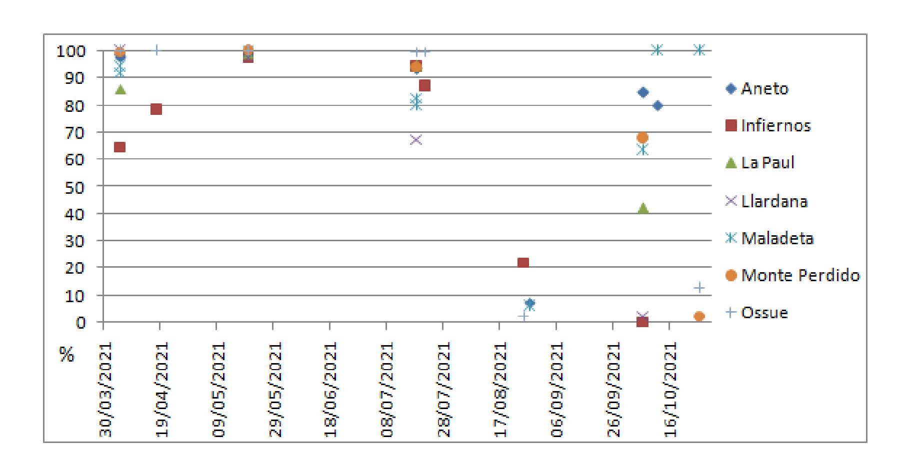


Figura 5. Evolución de la serie Ice mask de Sentinel-2 en el año 2021. Elaboración propia.

4.1.2. Evaluación de la evolución temporal de la cobertura de nieve combinando RapidEye y Sentinel-2 (Ice mask): ejemplo de 2017

La evolución de la superficie cubierta por nieve obtenida con ambas plataformas (RapideEye Y Sentinel-2) en los tres glaciares para los que se obtuvieron datos con RapidEye: Infiernos, La Paul y Llardana (Figura 6). En la Figura 6 se observa una evolución conjunta y coherente de la serie en ambos satélites para los tres glaciares. Bien es cierto que la unión entre los puntos de las series puede dar lugar a confusión. Sin embargo, en esta primera visualización se ha preferido mostrar esta visualización para observar la tendencia y analizar si es posible detectar errores. Lo que más llama la atención son los valores que muestra el glaciar de Infiernos con RapidEye al final de la serie, siendo estos muy elevados y presentando una tendencia al aumento de nieve, en discordancia a la evolución que muestran el glaciar de La Paul y el de Llardana.

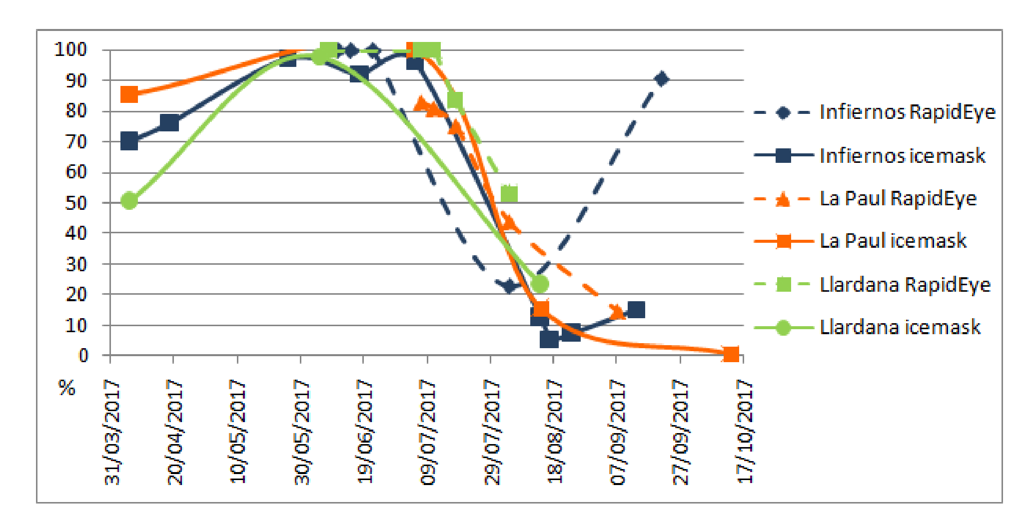


Figura 6. Evolución de las series de RapidEye y Ice mask para Sentinel-2 en los glaciares Infiernos, La Paul y Llardana en el año 2017. Elaboración propia.

Tabla 3. Valores mínimos de las series de cobertura de nieve en Ice mask. Subrayados, los valores más representativos. Elaboración propia.

Glaciar	*Mínimo de nieve (%)*									
	2017		*2018*		*2019*		*2020*		*2021*	
Aneto	24/08/2017	11,06	28/09/2018	28,30	08/10/2019	2,47	19/07/2020	99,60	28/08/2021	7,50
Infiernos	17/08/2017	5,57	21/10/2018	43,90	24/08/2019	19,44	30/09/2020	10,88	07/10/2021	0,46
La Paul	13/10/2017	0,61	23/09/2018	32,59	08/10/2019	9,31	19/07/2020	81,58	07/10/2021	42,11
Llardana	14/08/2017	23,05	04/08/2018	91,13	09/08/2019	31,66	19/07/2020	94,83	07/10/2021	2,65
Maladeta	24/08/2017	11,61	23/09/2018	21,59	14/08/2019	19,26	19/07/2020	94,53	28/08/2021	6,26
Monte Perdido	13/10/2017	14,84	03/10/2018	35,41	08/10/2019	18,97	19/07/2020	94,73	27/10/2021	2,65
Ossue	17/08/2017	0,64	26/09/2018	44,62	11/10/2019	0,26	21/08/2020	32,17	26/08/2021	2,52

Tabla 4. Valores mínimos de las series de cobertura de nieve. Comparación de valores Ice mask y RapidEye para los glaciares de Infiernos, La Paul y Llardana. Subrayados, los valores más representativos. Elaboración propia.

Mínimo de nieve				
Glaciar	*Ice mask*	*% nieve*	*RapidEye*	*% nieve*
Infiernos	17/08/2017	5,57	04/08/2017	22,96
	21/10/2018	43,90		
	24/08/2019	19,44	06/10/2019	4,59
	30/09/2020	10,88		
	07/10/2021	0,46	22/08/2021	32,05
La Paul	13/10/2017	0,61	07/09/2017	14,69
	23/09/2018	32,59		
	08/10/2019	9,31	07/09/2019	34,14
	19/07/2020	81,58		
	07/10/2021	42,11	06/09/2021	58,78
Llardana	14/08/2017	23,05	04/08/2017	52,98
	04/08/2018	91,13		
	09/08/2019	31,66	20/07/2019	69,04
	19/07/2020	94,83		
	07/10/2021	2,65	22/07/2021	66,62

4.2. Mínimos anuales de cobertra de nieve

El mínimo de cobertura de nieve en el periodo de estudio para los 7 glaciares analizados está recogido en la Tabla 3. De esta tabla solo los valores representados en verde son fiables para extraer conclusiones sobre la evolución de la cobertura de nieve, ya que indican el final del periodo de fusión, o pertenecen a series completas. El mínimo de nieve se produce entre el 17 de agosto y el 30 de septiembre.

Se presenta en la Tabla 4 los mínimos de cobertura de nieve anuales y la fecha para la que se han observado, haciendo una comparativa entre los valores de Ice mask (Sentinel-2) y los de RapidEye, disponibles para los glaciares de Infiernos, La Paul y Llardana.

Como se puede observar en la tabla 4, hay algunos años para los que no se han encontrado mínimos de nieve, esto se debe a series incompletas por ausencia de datos. De esta tabla se puede deducir que el mínimo de nieve se produce entre el 17 de agosto y el 7 de octubre.

5. DISCUSIÓN

El interés por la evolución de los glaciares del Pirineo ha aumentado en las últimas décadas como resultado del continuo retroceso de la superficie de los mismos. La consecuencia de esta tendencia se traduce en la desaparición de estos elementos en el entorno tal y como los conocemos hoy en día.

De 2011 a 2020, la superficie glaciar del Pirineo se ha reducido de 293,9 ha a 229,2 ha, lo que supone una pérdida del 23,2% (Vidaller et al., 2021). La tasa anual de pérdida de área glaciarizada durante ese periodo es similar al observado desde la década de 1980, lo que indica que la contracción de los glaciares en los Pirineos no se ha ralentizado en los últimos años (Vidaller et al., 2021). Sin embargo, los valores individuales de la reducción del área varían significativamente entre los glaciares. Por un lado, los glaciares más grandes: Aneto (47,35ha), Monte Perdido (30 ha), Maladeta (25,1 ha) y Ossue (26,6 ha), han presentado fuertes pérdidas de superficie y espesor de hielo, cambiando su pendiente y elevación media. Por otro lado, los glaciares más pequeños: Llardana (7,55 ha), La Paul (4,9 ha) e Infiernos (4,35 ha), están perdiendo área y espesor, dependiendo de los factores topográficos. En general, la evolución de los glaciares en el Pirineo depende principalmente de las condiciones climáticas regionales, aunque hay que tener en cuenta la importancia de la topografía local.

La mayoría de los estudios coinciden en que el calentamiento global es responsable de la disminución observada de los glaciares y de la reciente aceleración del retroceso que están teniendo.

Sin embargo, no siempre es fácil establecer una relación directa entre las fluctuaciones anuales del clima y los cambios que se producen en el área y la masa de un glaciar en particular (López-Moreno et al., 2016). Los glaciares de pequeño tamaño responden rápidamente a cambios en las nevadas anuales y el derretimiento de nieve/hielo, mientras que los glaciares medianos y grandes responden mucho más lentamente (Marshall, 2014).

Con la información que disponemos en este estudio, que tan solo cubre 5 años, no se pueden extraer conclusiones robustas. Otra limitación importante es la persistencia de las nubes en la zona de estudio. Muchas imágenes han tenido que ser descartadas debido a que los glaciares estaban cubiertos por nubes. Este hecho ha imposibilitado obtener series con una buena resolución temporal que permita un análisis en profundidad de la evolución de la nieve. Así, en algunos glaciares y para ciertos años, ha sido incluso difícil contar con una imagen al mes. Por ejemplo, para La Paul e Infiernos en el año 2018 se encontraron pocas imágenes con información válida. En cambio, el glaciar de Infiernos es el único que muestra una serie completa para el año 2020.

Otro problema que nos hemos encontrado a la hora de realizar este trabajo es la dificultad de clasificar píxeles. Esto se debe a que la zona de estudio requiere de una resolución espacial que permita detectar la presencia de nieve sobre áreas muy pequeñas (Revuelto et al., 2021). La resolución espacial, la resolución temporal, la presencia de nubes o sombras en algunas imágenes, celdas sin valores o valores erróneos son algunas de estas limitaciones que nos encontramos. Las sombras nos impiden observar con claridad la extensión de nieve que cubre el glaciar (Hall et al., 1995, Masson et al., 2018).

Con respecto a las imágenes Sentinel-2 de la colección de Theia Snow se han observado muchos valores erróneos que no han permitido elaborar series completas con información fiable, por ello, finalmente se decidió prescindir del producto Theia. Por otro lado, a partir de Google Earth Engine y gracias a la posibilidad de combinar y procesar distintas bandas de visualización de imágenes RGB, se ha podido obtener información fiable de Sentinel-2 creando una máscara de hielo denominada “Ice mask”. En esta máscara se han seleccionado como nieve los píxeles en los que los valores del NIR y NDSI son superiores a

0.4 (Gascoin et al., 2019), ya que es este umbral el que determina los píxeles de nieve en base a los valores de reflectancia según el tipo de superficie (Maurer, 2002).

Las imágenes RapidEye nos han proporcionado información mas precisa, gracias a la resolución espacial (5m) del satélite. Los resultados muestran que para poder tener suficiente resolución temporal y que la ausencia de datos ligada a la presencia de nubes (Parajka et al., 2010) (muy importante en las zonas de montaña) no suponga una importante limitación, se necesitan sensores satelitales con adquisiciones más recurrentes. Con avances en las bandas ópticas mejorará la observación de la cobertura de nieve.

La validación realizada entre las imágenes satélite y vuelos de drone del año 2020 (no mostrado en este trabajo), arrojó un intervalo de confianza de más del 90% en algunos casos. Por ejemplo, para el glaciar de Ossue la comparativa entre la imagen del drone y la imagen Sentinel-2 muestra un 0,6% de discrepancia. En el caso de las imágenes RapidEye, para el glaciar de Infiernos y el de La Paul, el grado de discrepancia con las imágenes del drone son del 5,82% y 8,2%, respectivamente.

Otros satélites ópticos que se han empleado recurrentemente para la observación de la superficie cubierta por nieve han sido descartados debido a su poca resolución espacial. Este es el caso de los sensores MODIS (Masson et al., 2018), que con su resolución de 500 m no permiten una observación de detalle del manto de nieve en los relativamente pequeños glaciares Pirenaicos. Esto muestra que el monitoreo de la capa de nieve en zonas específicas aún carece de observaciones de alta resolución espacial con una resolución temporal adecuada para superar las limitaciones de la cubierta de nubes (Revuelto et al., 2021). Dado que los nuevos sensores satelitales tienen algunas de estas debilidades, se requieren investigaciones destinadas a actualizar las imágenes satelitales de la capa de nieve ya disponibles.

6. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo ha sido analizar la manera de obtener información fiable de la cobertura de nieve en distintos glaciares del Pirineo mediante plataformas satelitales. La finalidad de este propósito es aumentar la comprensión de los procesos que rigen la evolución de los glaciares pirenaicos.

Para determinar la fuente de información (sensor satélite) más apropiada para caracterizar la evolución de la cobertura de nieve de alta resolución espacio-temporal se han procesado imágenes de los sensores Sentinel-2 y RapidEye. Por un lado, el sensor cuyas características espaciales se ajustan más a este análisis es RapidEye. Sin embargo, este satélite tan solo proporciona observaciones en el rango visible y no permite calcular índices de presencia de nieve o analizar bandas con información que permita determinar la presencia/ausencia de nieve. Esto hace necesaria una clasificación supervisada para cada día con imagen disponible. Por otro lado, la plataforma Google Earth Engine presenta muchas posibilidades del procesado de imágenes (una mayor diversidad de bandas espectrales), gracias a las cuales se ha podido elaborar una máscara (Ice mask) para clasificar las imágenes Sentinel-2 de todos los glaciares del trabajo.

La principal limitación que encontramos al realizar este trabajo es la disponibilidad de imágenes con una resolución espacial y temporal que se ajuste a las características de un análisis de la cobertura de nieve en zonas de montaña. Para poder establecer conclusiones más sólidas de la ocurrencia del mínimo de cobertura de nieve y su extensión, además de que este tipo de trabajos tienen que continuar en el tiempo permitiendo así generar una climatología, es necesario que los sensores de los distintos satélites tengan mayor resolución temporal y espacial.

Sin embargo, esta información abre una nueva línea de observación de la evolución los glaciares que permitirá conocer la extensión mínima de la cobertura de nieve y cuándo se ha producido, ayudando así a conocer mejor la dinámica de estos elementos tan representativos del Pirineo.

7. BIBLIOGRAFÍA

Barnett, T. P., Adam, J. C., and Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions, *Nature*, 438, 303–309.

Braithwaite, R. J., Hughes, P. D. (2020). *Regional geography of glacier mass balance variability over seven decades* 1946–2015, Frontiers in earth science.

Buisan, S. T., Saz, M. A., López-Moreno, J. I. (2015). Spatial and temporal variability of winter snow and precipitation days in the western and central Spanish Pyrenees, *International Journal of Climatology*, 35(2), 259–274.

Chueca, J., Julián, A., Saz, M. A., Creus, J., y López-Moreno, J. I. (2005). Responses to climatic changes since the Little Ice Age on Maladeta Glacier (Central Pyrenees), *Geomorphology*, 68, 167– 182.

Dozier, J. (1989). Firma espectral de la capa de nieve alpina del Landsat Thematic Mapper*, Remote Sensing of Environment.,* 28, 9-22.

Forlani, G., Dall'Asta, E., Diotri, F., Morra di Cella, U., Roncella, R., y Santise, M. (2018). Quality Assessment of DSMs Produced from UAV Flights Georeferenced with On-Board RTK Positioning. *Remote Sensing*, 10, 311.

García-Ruiz, J. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., Lorente, A., y Seeger, M. (2001). Los recursos hídricos superficiales del Pirineo aragonés y su evolución reciente, *Geoforma*. 192.

Gardent, M., Rabatel, A., Dedieu, J. P., and Deline, P. (2014). Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s, *Global Planet. Change*, 120, 24–37.

Gascoin, S., Grizonnet, M., Bouchet, M., Salgues, G., y Hagolle, O. (2019). Theia Snow collection: high-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data, *Earth System Science Data*, 11, 493–514.

Hall, D.K., Riggs, G.A., Salomonson, V.V. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data, *Remote Sens. Environ*, *54*, 127–140.

Jomelli, V., Chapron, E., Favier, V., Rinterknecht, V., Braucher, R., Tournier, N., et al. (2020). Glacier fluctuations during the Late Glacial and Holocene on the Ariège Valley, northern slope of the Pyrenees and reconstructed climatic conditions, *Mediterranean Geoscience Reviews,* 2(1), 37–51.

López-Moreno, J. I. (2005). Recent variations of snowpack depth in the central Spanish Pyrenees, *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 37, 253–260.

López-Moreno, J.I., Revuelto, J., Rico, I., Chueca-Cía, J., Julián, A., Serreta, A., Serrano, E., Vicente-Serrano, S.M., Azorin-Molina, C., Alonso-González, E., García-Ruiz, J.M. (2016). Thinning of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees since 1981, *The Cryosphere*, 10, 681–694.

Marshall, S. (2014), "Glacier retreat crosses a line", *Science*, 345, 872.

Masson, T., Dumont, M., Mura, M.D., Sirguey, P., Gascoin, S., Dedieu, J.-P., Chanussot, J. (2018). An Assessment of Existing Methodologies to Retrieve Snow Cover Fraction from MODIS Data, *Remote Sens*, *10*, 619.

Maurer, J. (2002). Retrieval of surface albedo from space*, Remote Sensing* Field Methods.

Mutanga, O., Kumar, L. (2019). Google Earth Engine Applications, *Remote Sensing. 11*(5), 591.

Parajka, J., Pepe, M., Rampini, A., Rossi, S., Blöschl, G. (2010). A regional snow-line method for estimating snow cover from MODIS during cloud cover, *Journal of Hydrology*, vol. 381, no. 3, pp. 203–212.

Pomeroy, J. W. and Gray, D. M. (1995). Snow cover accumulation, relocation, and management, *National Hydrology Research Institute*, Saskatoon, Sask., Canada.

Revuelto, J., Alonso-González, E., Gascoin, S., Rodríguez-López, G., López-Moreno, J.I. (2021). Spatial Downscaling of MODIS Snow Cover Observations Using Sentinel-2 Snow Products, *Remote Sensing,* 13(22), 4513.

Rico Lozano, I. I. (2019). Los glaciares de los Pirineos. Estudio glaciológico y dinámica actual en el contexto del cambio global.

Serrano, E., González-Trueba, J. J., Sanjosé, J. J., and del Río, L. M. (2011). Ice patch origin, evolution and dynamics in a températe high mountain environment: the Jou Negro, Picos de Europa (NW Spain), *Geogr. Ann*., 93, 57–70.

Vidaller, I., Revuelto, J., Izagirre, E., Rojas-Heredia, F., Alonso-González, E., Gascoin, S., René, P., Berthier, E., Rico, I., Moreno, A., Serrano, E., Serreta, A., López-Moreno, J.I. (2021). Toward an ice-free mountain range: Demise of Pyrenean glaciers during 2011–2020, *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL094339.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 12-21

Efectos del cambio de uso de suelo en la susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca media-alta del río Mira, Ecuador. Una mirada al pasado y una visión al futuro

Paul Arias-Muñoz[12], Miguel Ángel Saz[23], Severino Escolano[2]

[1] *Carrera de Recursos Naturales Renovables, Universidad Técnica del Norte, Avenida 17 de Julio 5-21, Ibarra-Ecuador*
[2] *Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza*
[3] *Instituto Universitario de Ciencias Ambientales de Aragón. Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza*

773684@unizar.es, masaz@unizar.es, severino@unizar.es

RESUMEN: La cobertura y uso de suelo es uno de los principales factores dinámicos en el desencadenamiento de deslizamientos de tierra. El objetivo de la presente investigación fue determinar los efectos del cambio de uso del suelo en la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra (LLS) en un escenario actual y para dos escenarios futuros. El área de estudio seleccionada fue la cuenca del río Mira ubicada al noroccidente de Ecuador. En la cuenca mediante el uso de herramientas SIG se identificaron ocho clases de cobertura de suelo (bosque, páramo, matorral, cultivos, pastos, zona urbana, área sin vegetación y cuerpos de agua) para los años 1996 y 2018. Posteriormente se crearon dos escenarios futuros de cobertura de suelo para los años 2030 y 2040. El análisis de LLS se llevó a cabo para los mismos años mediante la aplicación de método de radio-frecuencia. En este modelo probabilístico se establece una relación espacial entre el lugar de ocurrencia de un deslizamiento y los factores causales de LLS. Los efectos del cambio de uso del suelo en la LLS se determinaron mediante una regresión ponderada geográficamente (GWR) para los escenarios 1996-2018, 2018-2030 y 2018-2040. Se tomó como hipótesis que la LLS varía cuando existe un cambio de cobertura del suelo. Los resultados muestran que hay un aumento de LLS desde el año 1996 hasta el 2018, incluso para los años futuros, 2030 y 2040. Esto se debe principalmente a la disminución de los bosques y los pastos. En todos los escenarios analizados para estas coberturas se obtuvo un valor R-cuadrado ajustado superior a 0,52. Los resultados sugieren que el cambio de superficie en bosques y pastos afecta la distribución espacial de LLS. Esto deja en evidencia que las políticas de uso de suelo en el territorio han sido ineficientes.

Palabras-clave: cambio de suelo, deslizamientos, regresión geográfica ponderada, Ecuador.

1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos naturales se encuentran entre las principales causas de la evolución del paisaje (Mauri et al., 2022; Pisano et al., 2017). Estos son el resultado de la compleja interacción espacio-temporal de varios factores desencadenantes, entre los que se encuentran el clima, las condiciones litológicas y orográficas y, por supuesto, la cobertura del suelo (Reichenbach et al. 2014, 2018). La cobertura y uso de suelo es considerado un factor altamente dinámico, producto de cambios antropogénicos que puede incidir directamente en la estabilidad de la pendiente y provocar cambios en las actividades humanas (Glade, 2003).

Debido a la distribución espacial aleatoria de los recursos naturales y sus factores condicionantes (Wang et al., 2013), a menudo existe heterogeneidad y correlación espacial entre las variables. Por ello, al estudiar los deslizamientos es esencial comprender las interacciones espaciales entre la ubicación de los deslizamientos y sus factores condicionantes (Erener y Düzgün, 2012). A diferencia de los métodos estadísticos estándar, la combinación de elementos espaciales en modelos de probabilidad se convierte en un método más robusto para predecir la susceptibilidad a deslizamiento. Debido a que, la determinación de la relación de factores causales con los deslizamientos de tierra pasados ocurridos en un territorio forman la base para la predicción de futuras zonas susceptibles a deslizamientos (Shano et al., 2020). Además, la

inclusión de modelos de regresión espacial permite analizar la variabilidad espacial presente entre cualquier parámetro incidente y los eventos o zonas donde se presentan deslizamientos (García y Castillo, 2019). Bajo ese contexto, el objetivo de la presente investigación fue determinar los efectos del cambio de uso del suelo en la distribución espacial de la susceptibilidad a deslizamientos. Para ello, usando herramientas de Sistema de Información Geográfica (SIG) y teledetección se determinaron los coberturas y usos (LULC) de suelo para los años 1996, 2018 y se proyectaron los LULC para los años 2030 y 2040, a la vez, mediante la aplicación del método probabilístico de radio-frecuencia se determinó la LLS. Finalmente, se analizó la correlación espacial entre la variación espacial de los cambios de uso de suelo y cambios en LLS en un escenario actual, entre los años 1996 y 2018, y para dos escenarios futuros, entre los años 2018-2030 y 2018-2040.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Mira es unidad hídrica transfronteriza ubicada al noroeste de Ecuador y suroeste de Colombia. El presente estudio se realizó en la sección media-alta localizada en territorio ecuatoriano que abarca una superficie de 5.320,87 km^2 con una pendiente media de 19° y se origina en los páramos ecuatorianos entre los 3.500 y 4.800 msnm. Desde la sección alta hasta la más baja de la cuenca hidrográfica se encuentran otras coberturas como, bosques, matorrales, cultivos, pastos, zonas urbanas y cuerpos de agua. Los principales relieves son de tipo volcánico colinado y volcánico montañoso. La geología se caracteriza por presentar, depósitos sedimentarios, rocas sedimentarias detríticas, rocas metamórficas foliadas y no foliadas, flujos de lavas, piroclastos, y rocas ígneas de tipo, plutónicas, volcánicas y filonianas.

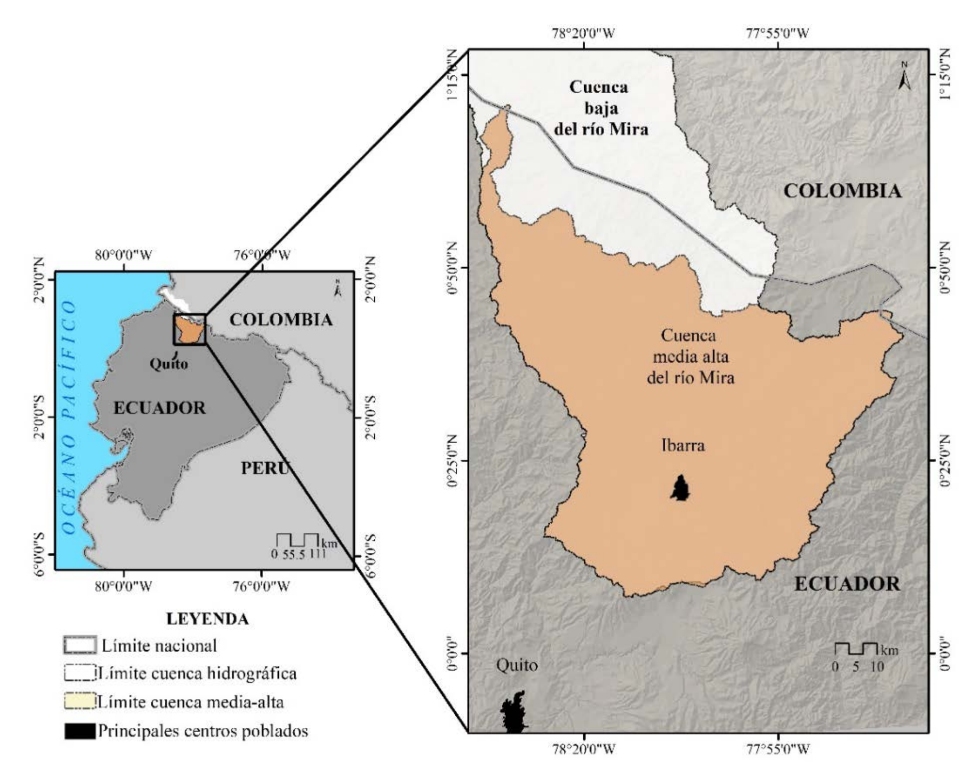


Figura 1. Localización del área de estudio.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Análisis del cambio de uso de suelo y proyección futura a los años 2030 y 2040

Se obtuvieron las coberturas y usos de suelo para los años 1996, 2007 y 2018, mediante una clasificación supervisada con ocho áreas de entrenamiento en tres imágenes satelitales multiespectrales, Landsat 5 para el año 1996, Landsat 7 para el año 2007 y Sentinel 2B para el año 2018. En las tres imágenes se realizaron las correcciones atmosféricas y radiométricas en el software QGIS y las geográficas mediante el uso del modelo digital de elevación *Shuttle Radar Topography Mission* (DEM-SRTM), de 30 metros de resolución. En la imagen Sentinel se realizó un remuestreo mediante la técnica de vecino más cercano y se aumentó el tamaño del píxel a 30 metros (Astola et al., 2019). Se utilizó un área mínima cartografiable de 4

ha de acuerdo a lo recomendado por Salitchev (1979). La clasificación fue validada mediante la aplicación de la matriz de confusión y el correspondiente índice de Kappa de Cohen (1960). En la clasificación de la cobertura y uso de suelo para los años 1996, 2018 se obtuvieron índices Kappa de 0,72 y 0,85 respectivamente.

Para la proyección futura del cambio de uso se utilizaron cadenas de Markov de primer orden en el módulo de modelización de Cambios Terrestres (LCM, *Land Change Modeler*) del software TerrSET 2020 (Eastman, 2016). El análisis de la cadena de Markov (MCA) se basa en que, las tasas de cambio observadas en un periodo (T1 a T2) permanecerán igual durante el período de simulación (T2 a T3) (Eastman, 2016). En el estudio primero se validó la transición en dos cambios históricos de tiempo 1 (T1=1996) al tiempo 2 (T2=2007) y al tiempo 2 (T2=2018). Después se consideró como tiempo 2 (T2) los años 2030 y 2040, y tiempo 1 (T1) el año 2018. Es decir, se estimaron cambios de LULC durante los intervalos 1996-2018, 2018-2030 y 2018-2040 usando submodelos de transición. Los insumos utilizados se dividen entre variables, básicas de entrada y explicativas espaciales. Las variables básicas de entrada fueron las coberturas y usos de suelo para los años 1996, 2007, y 2018. Las variables explicativas espaciales fueron estáticas, como elevación, pendiente; dinámicas como, distancia a vías, distancia a zonas urbanas, y restrictiva como, áreas naturales protegidas.

3.2. Determinación de la relación de los cambios de uso de suelo en la susceptibilidad a deslizamientos (LLS) y entre los cambios de uso de suelo

En primer lugar, se determinó la LLS para cuatro escenarios (1996, 2018, 2030, 2040) aplicando el método probabilístico de Radio-Frecuencia, que establece una relación espacial entre la distribución de deslizamientos después de comparar los factores causales de deslizamientos con eventos pasados (Lee y Pradhan, 2007). Para ello, se cartografiaron 115 eventos pasados de deslizamientos. El inventario de deslizamientos se obtuvo con fotointerpretación mediante el uso de fotografías aéreas (en blanco y negro) desarrolladas por el Instituto Geográfico Militar de Ecuador en el año 1999, con series de imágenes de Google Earth entre los años 2007 y 2018, y mediante validación en campo. Los factores causales para la generación de deslizamientos fueron topográficas (pendiente, aspecto y curvatura) derivadas del DEM-SRTM, geológicas (litología y distancia a fallas geológicas), climáticas (precipitación), hidrológicas (distancia a ríos), antrópicas (distancia vías de comunicación y cobertura y uso de suelo) (Lee et al., 2004; Yalcin, 2008; Yalcin et al., 2011). La tasa de predicción de cada variable fue obtenida mediante la aplicación de operaciones de valores máximos y mínimos obtenidos de acuerdo a la ecuación (1) (Althuwaynee et al., 2014). De este modo la diferencia absoluta calculada entre el máximo y el mínimo en cada factor es dividida por la diferencia absoluta entre el máximo y mínimo absoluto de todos los factores.

$$PR = (SA_{max} - SA_{min})/SA_{max} - SA_{min})min \quad (1)$$

donde SA es el índice de la asociación espacial de factores espaciales y deslizamientos; y PR es la tasa de predicción.

Se construyó el modelo de radio frecuencia (LSI), en base a los criterios ponderados estimados por cada factor, que se mantuvieron constantes en todos los escenarios, excepto el factor "cobertura de uso de suelo". Para lo cual los pixeles deslizados tomados de la muestra del inventario de deslizamientos se correlacionan con los pixeles de los factores causales, cuantificando en porcentajes la frecuencia de coincidencia respecto al área de estudio (García y Castillo, 2019; Shano et al., 2020). Es decir, este método utiliza la correlación entre cada uno de los factores causales con la distribución espacial de deslizamientos pasados en el área de estudio

Todos los modelos de susceptibilidad fueron reclasificados en cuatro intervalos: 0-20, 20-40, 40-60, > 60. Como último umbral se considera el valor 60, ya que otros autores establecen umbrales entre 60-80 y 80-100 para definir las clases LLS Alta y Muy Alta. De esta manera, se obtuvieron cuatro clases de LLS respectivamente: Nula o Muy Baja, Baja, Moderada y Severa. La validación se realizó mediante la aplicación de la curva ROC. De acuerdo a los criterios propuestos por Hosmer Jr et al. (2013) se adoptaron umbrales entre 0,7, 0,8 y 0,9 AUC que establecen al modelo como, aceptable, excelente y sobresaliente.

Se analizó la incidencia de los cambios de cobertura y uso de suelo en la LLS, mediante la aplicación de ecuación (2) de la Regresión Geográfica Ponderada (GWR). GWR es una técnica de regresión espacial utilizada para estudiar las variaciones locales en las variables (Brunsdon et al., 1996).

$$y_i = \beta_0 \left(u_{i,} v_i\right) + \sum_{j=1}^{n} \beta_j \left(u_i, v_i\right) x_{ij} + \epsilon_i \quad (2)$$

donde y_i es la variable dependiente, i representa las regiones del área de estudio, $(u_{i,} v_i)$ son las coordenadas para la región observada; $\beta_j\ (ui_, v_i)$ es el coeficiente de regresión local para la observación i, x_{ij} es la variable independiente y ϵ_i es el error de la región (Li et al., 2019).

Se tomó como hipótesis que la LLS varía cuando existe un cambio de cobertura suelo. Para ello, se crearon siete modelos considerando como variables predictoras los cambios en las coberturas de suelo: área sin vegetación, bosque, páramo, matorral, cultivos, pastos, y zonas urbanas. Los periodos interanuales analizados fueron, 1996-2018, 2018-2030 y 2030-2040, y para analizar la correlación espacial en el territorio se dividió la cuenca en 30 unidades hidrográficas. Los indicadores de confiabilidad del modelo de regresión GWR fueron, el R-cuadrado y R-cuadrado ajustado que representaron las medidas de bondad de ajuste del modelo, el AICc como indicador del rendimiento del modelo, y el sigma cuadrado como indicador de la estimación de los mínimos cuadrados. En los residuales obtenidos de la regresión se analizó la autocorrelación espacial mediante la aplicación del índice de Morans a un nivel de significancia del 95%. Para lo cual se consideró como hipótesis que la distribución de los residuales es aleatoria.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis del cambio de uso de suelo y proyección futura a los años 2030 y 2040

Los resultados muestran cambios en la distribución espacial de cobertura de suelo entre los años 1996 y 2028 (Figura 2). El bosque, por ejemplo, para el año 2018 cubría 1562.19 km^2 y disminuyó un 20% respecto al año 1996. La superficie de matorral disminuyó aún más, al perder el 67% de su superficie. Al contrario, las áreas sin vegetación y los cultivos son las categorías que más se expandieron, al aumentar un 196% y un 165%, respectivamente, desde el año 1996 al año 2018. Los centros urbanos también se expandieron y casi duplicaron su superficie al pasar de 24,04 km^2 en 1996 a 46,08 km^2 en 2018. Otras coberturas como pastos y páramo disminuyeron de superficie entre estos años, pero en proporciones más bajas que el resto de las coberturas, 14% y 2% respectivamente.

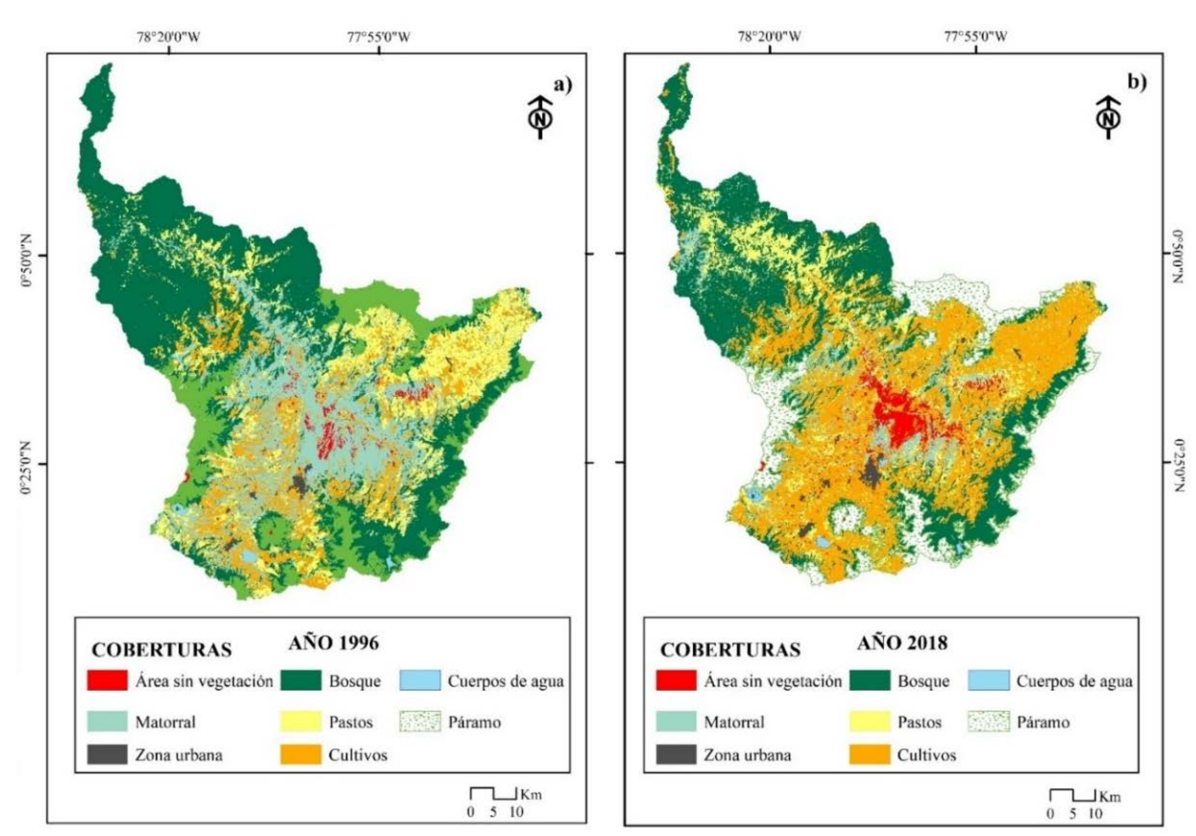


Figura 2. Coberturas y usos de suelo, a) Año 1996, b) Año 2018

Siguiendo la misma tendencia observada, la distribución de la cobertura de suelo para los años 2030 y 2040 será heterogénea, pero con cambios significativos (Figura 3). En el escenario proyectado para el año 2030 se mantiene en general la tendencia observada durante el periodo 1996-2018. Los centros urbanos y los cultivos serán las únicas coberturas que se seguirán expandiendo, al incrementar en un 52% y un 17% respectivamente. Al contrario, de lo que sucedió entre los años 1996-2018, donde las áreas sin vegetación y los matorrales eran las coberturas con más cambios, y los páramos y pastos las coberturas menos alteradas, esta situación cambiaría para el año 2030. En este caso, las áreas sin vegetación y matorrales

mantendrán casi en su totalidad la superficie alcanzada en el 2018, pero los páramos y pastos registrarán pérdidas significativas, al reducirse en un 21% y 15% respectivamente. El bosque se seguirá reduciendo y perderá un 7% de su cobertura respecto a la presentada en el año 2018. Los resultados muestran que uno de los principales impactos del cambio de uso de suelo es la deforestación. Estos datos concuerdan con los cambios registrados por Endara y Arias Muñoz (2020) en la cuenca media-alta del río Mira, quienes señalaron que la tasa de deforestación anual es de 0,52%. Ambas tasas, se asemejan a la tasa anual de deforestación de Ecuador, la cual es cercana a 0,65. A la vez el aumento progresivo de cultivos concuerda con lo señalado por Castro et al. (2013), quienes plantean que en el Ecuador, cultivos y pastos han reemplazado a otras coberturas como bosques y páramos. La expansión agropecuaria en Ecuador, de acuerdo con Sierra (2013) en dos periodos analizados entre 1990-2000 y 2000-2008 se debió a que un 99% de los bosques se transformaron a cultivos y pastos. Para el año 2030 y hasta el año 2040 los centros urbanos y los cultivos serán las únicas coberturas que se seguirán expandiendo. Los cultivos y centro urbanos se seguirán expandiendo progresivamente, hasta 2040, mientras que, los bosques y pastos serán las coberturas que más se reducirán. Estos resultados son consistentes con los apuntados por Ochoa-Cueva et al. (2015) y confirman en nuestro caso que los escenarios proyectados siguen la tendencia del periodo histórico utilizado.

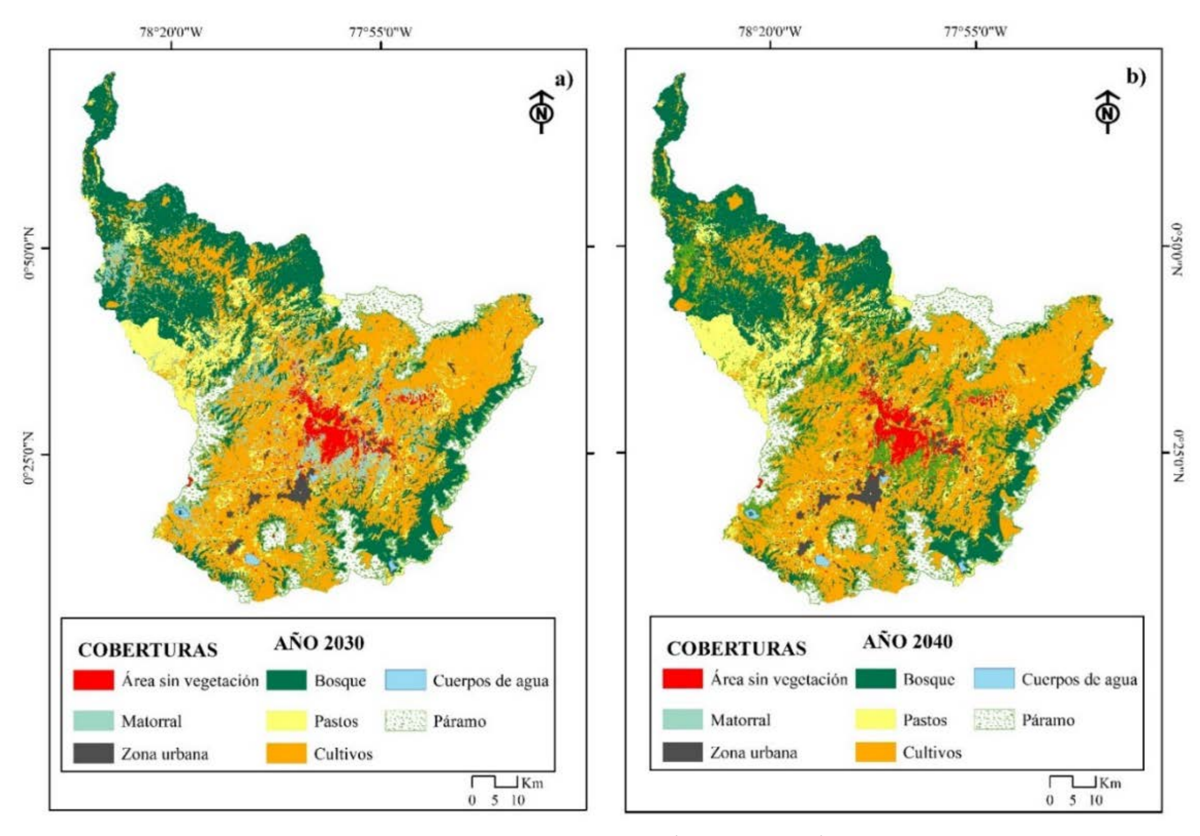


Figura 3. Coberturas y usos de suelo, a) Año 2030, b) Año 2040.

4.2. Determinación de la relación de los cambios de uso de suelo en la susceptibilidad a deslizamientos

El estudio analiza la relación entre la ocurrencia de deslizamientos de tierra y la actividad de uso de suelo utilizando la superposición espacial y la modelización estadística. El modelo base de deslizamientos, para el año 2018, obtuvo un valor r de la Curva ROC de 0,92, lo cual según Hosmer Jr et al. (2013) es sobresaliente. Entre los años 1996- y 2018 la distribución de la susceptibilidad en general presenta poca variación, con cambios mínimos casi imperceptibles excepto en la zona noroccidente de la cuenca hidrográfica (Figura 4). La clase LLS “nula o muy baja” se mantiene igual durante estos dos años, porque básicamente corresponde a zonas urbanas, cuerpos de agua y zonas con relieves planos. La clase LLS severa presentó mayor cambio, aunque únicamente aumentó un 2% al pasar del 13% al 15%. La susceptibilidad severa se produce esencialmente en sectores con pendiente colinada y abrupta y cerca de la principal vía de comunicación. Esto último demostraría la importancia de considerar la estabilidad del talud tanto en diseño con el mantenimiento de las vías.

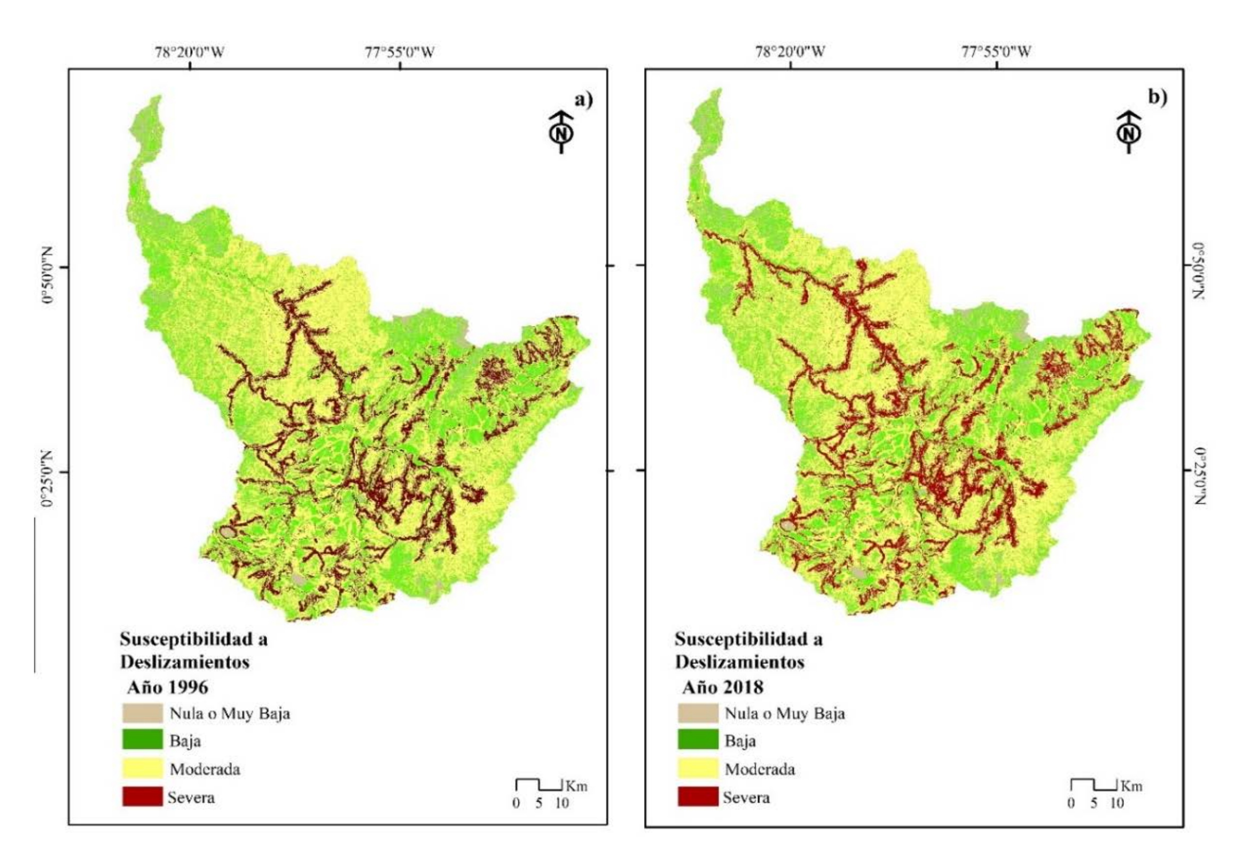


Figura 4. Coberturas y usos de suelo, a) Año 1996, b) Año 2018

Los resultados muestran una dinámica ambiental, ya que el cambio de uso del suelo influye en la LLS con el tiempo. Para el año 2018, el 62% de la susceptibilidad severa se presentó en zonas que desde el año 2016 persistieron como cultivos o se transformaron a cultivos y pastos. Sin embargo, las coberturas con mayor porcentaje de susceptibilidad severa respecto a su superficie son, pastos, matorrales, las zonas que se quedaron sin cobertura vegetal y las zonas que se transformaron a pastos (Figura 5). Esto esencialmente significa que el incremento de pastos, cultivos y áreas de vegetación desde el año 1996 al 2018 influyó en la distribución de susceptibilidad severa en el año 2018. Es decir, el aumento de zonas sin vegetación y de coberturas como pastos o cultivos se tradujo en pérdida de bosques, que se asocia con el incremento de la susceptibilidad severa a deslizamientos. Esta asociación espacial se comprueba con los datos de tres modelos espaciales de los siete propuestos, en los cuales justamente cambios en bosques, matorrales y pastos son variables predictoras en la variación de la susceptibilidad severa. Los valores R-cuadrado ajustado en tres modelos GWR son de 0,68, 0,64 y 0,53, respectivamente, indicando claramente una asociación espacial entre la variación de la susceptibilidad severa y la pérdida de bosque, matorrales y el aumento de pastos (Tabla 1). Los valores del p-valor, en los índices de Morans fueron, 0,42, 0,97 y 0,71. Estos datos comprobaron la hipótesis que para estos tres modelos existió aleatoriedad de los datos. Finalmente, la confiabilidad de los modelos se demuestra porque los tres modelos presentan valores más reducidos respecto al resto de los valores AICs y SIGMA proporcionando mejor ajuste de estos.

Tabla 1. Valores Estadísticos de los Modelos GWR para diferentes usos entre los años 1996-2018.

	Área sin vegetación	Bosque	Páramo	Matorral	Cultivos	Pastos	Zona Urbana
R^2	0,47	**0,69**	0,47	**0.,5**	0,48	**0,59**	0,45
R^2 ajustado	0,38	**0,68**	0,37	**0,64**	0,40	**0,53**	0,35
AICc	146,66	124,40	147,05	136,91	145,46	138,40	147,90
SIGMA	2,48	1.77	2.49	1,89	2,45	2,17	2,53
z-valor (Morans)	0,45	0,82	0,24	0,03	-0.12	-0,36	0,45
p-valor (Morans)	0,68	0,42	0,8	0,97	0,9	0,71	0,64

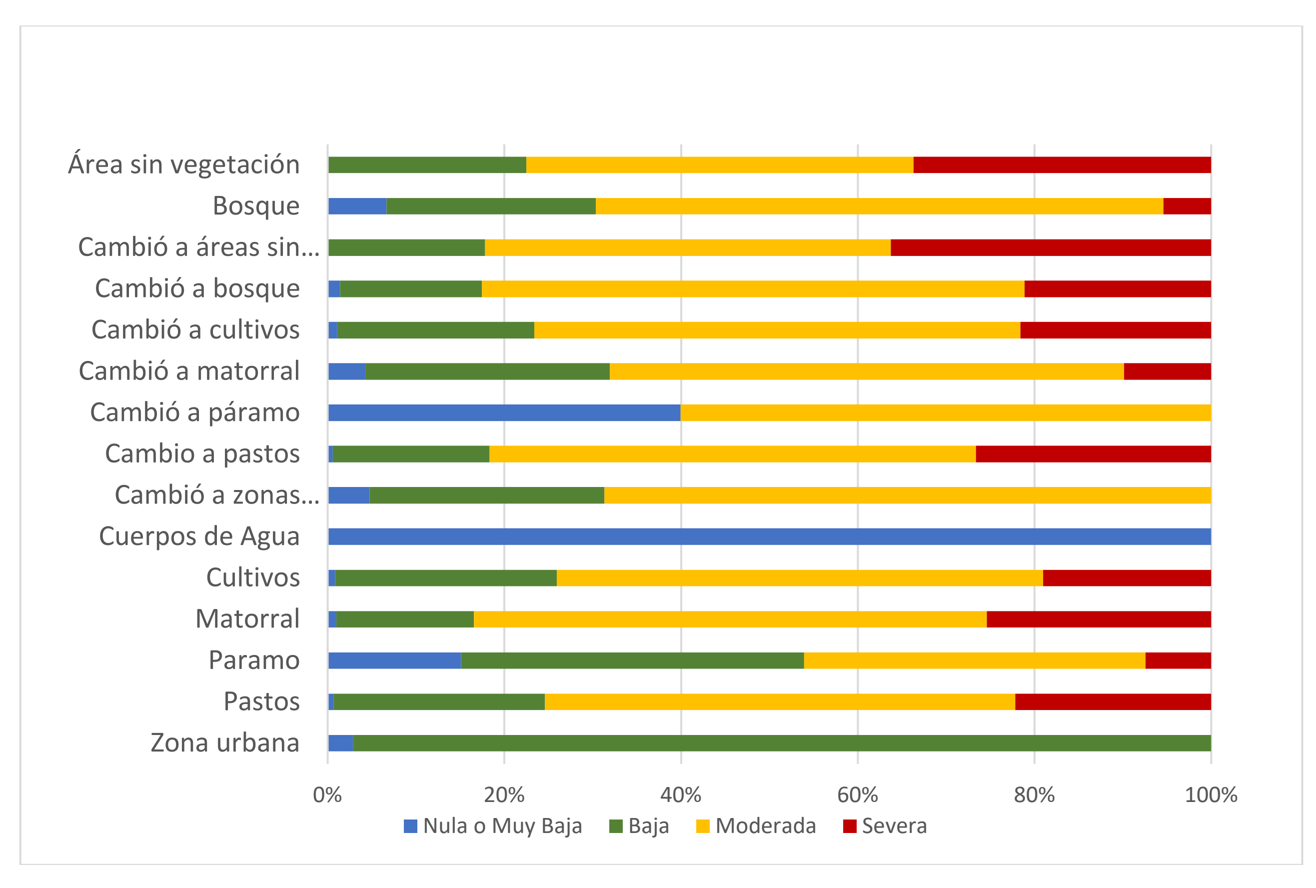


Figura 4. Susceptibilidad a deslizamientos por transición de cobertura de suelo, Años 1996-2018

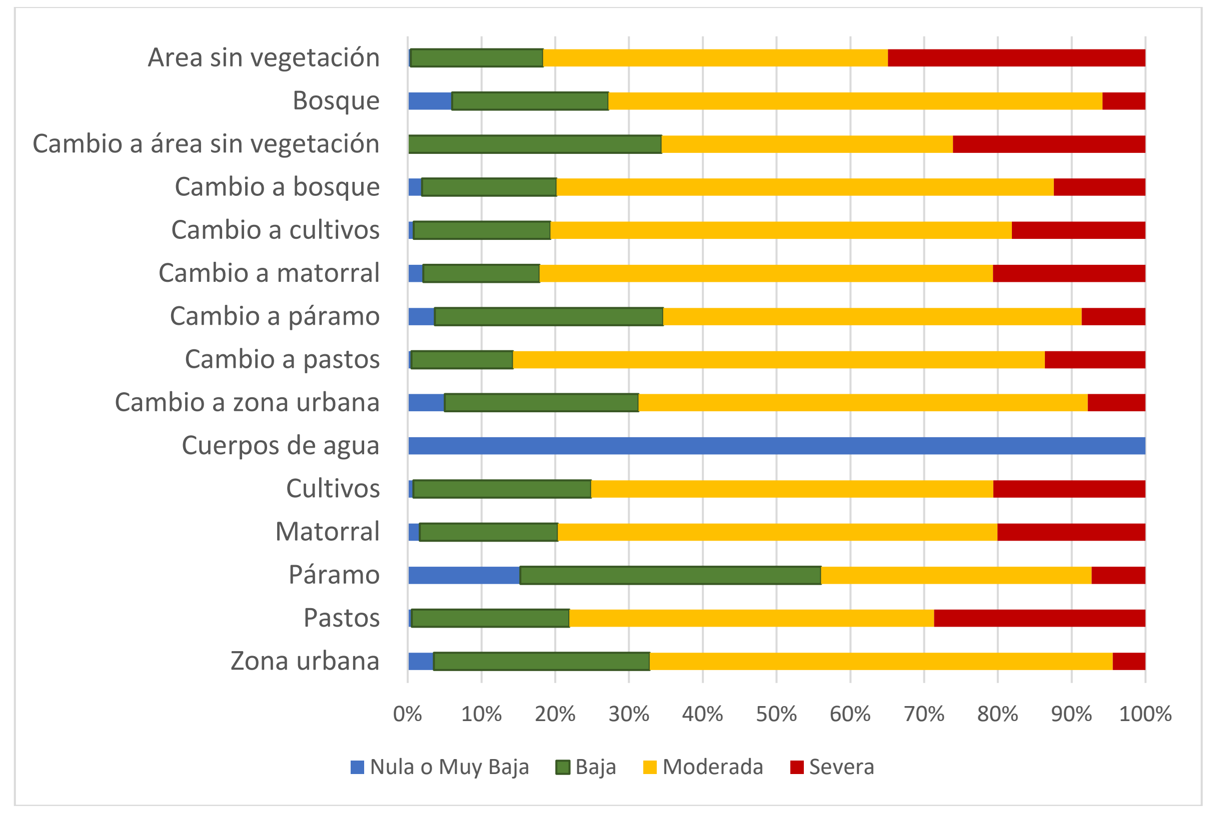


Figura 5. Susceptibilidad a deslizamientos por transición de cobertura de suelo Año 2018-2030

Para los escenarios futuros la susceptibilidad a deslizamientos mantiene la misma tendencia observada entre los años 1996-2018. Para el año 2030 la susceptibilidad severa se conserva mientras que para el año 2040 se incrementa en un punto porcentual. Aunque es un aumento reducido implica impactos y su origen sin duda se originará en las transiciones esperadas de las coberturas de suelo. Entonces, para el año 2030 se espera un escenario muy similar al año 2018, porque para este escenario futuro el 68% de la susceptibilidad severa se presentará en zonas que desde este año persistieron como cultivos, pastos o se transformaron a estos. Manteniendo la misma tendencia que el año 2018, las coberturas con mayor porcentaje de susceptibilidad severa respecto a su superficie son cultivos, pastos, áreas sin vegetación y aquellas coberturas que se transformaron a matorral (Figura 5). En consecuencia, la variación de la cobertura de pastos y cultivos, incidirán en los cambios de la susceptibilidad severa a deslizamientos. Sin embargo, está asociación espacial únicamente se comprobó entre la variación pastos y susceptibilidad severa con un R-cuadrado ajustado (GWR) de 0,85 con un p-valor de 0,3 para el índice de Morans lo cual comprueba la hipótesis de aleatoriedad de los datos. Otra cobertura cuyos cambios tendrán incidencia futura en la variación de la susceptibilidad severa es el bosque, porque el modelo espacial (GWR) obtuvo un R-cuadrado ajustado de 0,76 con un p-valor de 0,7 para el índice de Morans que también comprueba la aleatoriedad de los datos. Hasta el año 2040 la tendencia se observa será similar por lo que la asociación espacial entre los cambios de superficie esperados en el bosque y el páramo incidirán en los cambios de la susceptibilidad severa esperada. Finalmente, los modelos para bosques y pastos entre los años 2018-2030 (18-30) y 2018-2040 (18-40) presentan valores más reducidos en los indicadores AICs y SIGMA, respecto al resto de modelos (Tabla 2). Por lo que, el rendimiento de los modelos es mejor porque proporciona un mejor ajuste.

Tabla 2. Valores Estadísticos de los Modelos GWR para diferentes usos entre los años 2018-2030 y 2018-2040

	Área sin vegetación		Bosque		Páramo		Matorral		Cultivos		Pastos		Zona Urbana	
AÑOS	18-30	18-40	18-30	18-40	18-30	18-40	18-30	18-40	18-30	18-40	18-30	18-40	18-30	18-40
R^2	0,10	0,03	**0,77**	**0,71**	0,18	0,12	0,39	0,32	0,35	0,31	**0,86**	**0,82**	0,16	0,04
R^2 ajustado	0,02	0,00	**0,76**	**0,70**	0,13	0,09	0,20	0,13	0,24	0,18	**0,85**	**0,81**	0,05	0,00
AICc	125,6	137,5	82,7	101,6	121,5	134,6	123,6	137,1	119,0	133,5	68,5	87,0	125,4	137,3
SIGMA	1,79	2,21	0,89	1,21	1,69	2,10	1,61	2,05	1,57	1,99	0,70	0,95	1,76	2,20
z-valor (Morans)	0,45	0,96	0,37	0,15	-0,51	0,35	1,1	1,35	1,3	1,79	1,03	0,52	0,75	0,81
p-valor (Morans)	0,64	0,33	0,7	0,87	0,6	0,72	0,26	0,17	0,19	0,07	0,3	0,59	0,4	0,41

5. CONCLUSIONES

En la cuenca media-alta del río Mira entre los años 1996-2018 ha existido cambios en la cobertura de suelo. Al contrario de los bosques, pastos y páramos que disminuyeron en un 20%, 14% y 2% respectivamente, las áreas sin cobertura vegetal, cultivos y centros urbanos se incrementaron en un 196%, 165% y un 91% respectivamente. En la proyección futura, al año 2030, los centros urbanos y cultivos se continuarán expandiendo en un 52% y un 17% respectivamente, a la vez, bosques, pastos y páramos continuarán reduciéndose en un 7%, 15% y 21%. En cambio, matorrales y áreas sin vegetación conservarán casi en su totalidad la superficie alcanzada en el año 2018. Para el año 2040 se proyecta que esta misma tendencia de ganancia en coberturas antrópicas y pérdida en coberturas naturales se conservará.

Los resultados de la modelación espacial permitieron identificar los modelos con mejor y menor ajuste (R-cuadrado ajustado) de correlación espacial entre la variación de la susceptibilidad a deslizamientos y cambios en la cobertura de suelo. En el escenario actual, entre los años 1996 y 2018, la pérdida de bosque, matorral y el aumento de pastos incidieron en la variación de la susceptibilidad severa en todo el territorio. La misma tendencia se repite para los escenarios futuros a los años 2030 y 2040, con la diferencia que los cambios de matorral no afectarían a la distribución espacial de la susceptibilidad severa. En consecuencia, la variación de la susceptibilidad severa a deslizamientos a través del tiempo en la cuenca media-alta del Mira se debe a cambios en la superficie de pastos y bosques. Considerando los escenarios históricos se infiere que la gestión ambiental y planificación de los usos del suelo no han

contribuido a reducir la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra. Sin embargo, los usos antrópicos podrían reorientarse, de acuerdo con los resultados obtenidos, para tomar medidas correctivas sobre este problema geomorfológico de impacto socioeconómico.

6. BIBLIOGRAFÍA

Althuwaynee, O. F., Pradhan, B., Park, H.-J., y Lee, J. H. (2014). A novel ensemble bivariate statistical evidential belief function with knowledge-based analytical hierarchy process and multivariate statistical logistic regression for landslide susceptibility mapping. *CATENA*, *114*, 21-36. https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.011

Astola, H., Häme, T., Sirro, L., Molinier, M., y Kilpi, J. (2019). Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region. *Remote Sensing of Environment*, *223*, 257-273.

Brunsdon, C., Fotheringham, A. S., y Charlton, M. E. (1996). Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical analysis*, *28*(4), 281-298.

Castro, M., Sierra, R., Calva, O., Camacho, J., López, F., y Lozano, P. (2013). *Zonas de Procesos Homogéneos de Deforestación del Ecuador: Factores promotores y tendencias al 2020*. https://www.researchgate.net/profile/Rodrigo-Sierra-6/publication/268390247_Zonas_de_Procesos_Homogeneos_de_Deforestacion_del_Ecuador_Factores_promotores_y_tendencias_al_2020/links/546a69d20cf2397f783018ac/Zonas-de-Procesos-Homogeneos-de-Deforestacion-del-Ecuador-Factores-promotores-y-tendencias-al-2020.pdf

Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement*, *20*(1), 37-46.

Eastman, J. (2016). IDRISI terrset manual. *Clark Labs-Clark University: Worcester, MA, USA*.

Endara, F., y Arias Muñoz, P. (2020). Efectos de la deforestación en la producción de caudales en la cuenca media alta del río Mira para el período 2000–2014. En *Estrategias de adaptación al cambio climático: El caso de la cuenca del Río Mira.* (pp. 21-43). Göttingen, Editorial Cuvillier Gotinga. https://sustentabilidadyambiente.files.wordpress.com/2020/06/libro-riego.pdf

Erener, A., y Düzgün, H. S. B. (2012). Landslide susceptibility assessment: What are the effects of mapping unit and mapping method? *Environmental Earth Sciences*, *66*(3), 859-877. https://doi.org/10.1007/s12665-011-1297-0

García, A. C. F., y Castillo, J. N. P. (2019). Técnicas para la predicción espacial de zonas susceptibles a deslizamientos. *Avances: Investigacion en Ingeniería*, *16*(1), 20-48.

Glade, T. (2003). Landslide occurrence as a response to land use change: A review of evidence from New Zealand. *Catena*, *51*(3-4), 297-314. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00170-4

Hosmer Jr, D. W., Lemeshow, S., y Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression* (Vol. 398). John Wiley y Sons.

Lee, S., Choi, J., y Woo, I. (2004). The effect of spatial resolution on the accuracy of landslide susceptibility mapping: A case study in Boun, Korea. *Geosciences Journal*, *8*(1), 51.

Lee, S., y Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, *4*(1), 33-41. https://doi.org/10.1007/s10346-006-0047-y

Li, S., Zhou, C., Wang, S., Gao, S., y Liu, Z. (2019). Spatial Heterogeneity in the Determinants of Urban Form: An Analysis of Chinese Cities with a GWR Approach. *Sustainability*, *11*(2), 479. https://doi.org/10.3390/su11020479

Mauri, L., Straffelini, E., y Tarolli, P. (2022). Multi-temporal modeling of road-induced overland flow alterations in a terraced landscape characterized by shallow landslides. *International Soil and Water Conservation Research*, *10*(2), 240-253. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.07.004

Ochoa-Cueva, P., Fries, A., Montesinos, P., Rodríguez-Díaz, J. A., y Boll, J. (2015). Spatial Estimation of Soil Erosion Risk by Land-cover Change in the Andes OF Southern Ecuador: SOIL EROSION RISK BY LAND-COVER CHANGE IN SOUTHERN ECUADOR. *Land Degradation y Development*, *26*(6), 565-573. https://doi.org/10.1002/ldr.2219

Pisano, L., Zumpano, V., Malek, Ž., Rosskopf, C. M., y Parise, M. (2017). Variations in the susceptibility to landslides, as a consequence of land cover changes: A look to the past, and another towards the future. *Science of The Total Environment*, *601-602*, 1147-1159. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.231

Reichenbach, P., Mondini, A., Rossi, M., y others. (2014). The influence of land use change on landslide susceptibility zonation: The Briga catchment test site (Messina, Italy). *Environmental management*, *54*(6), 1372-1384. https://doi.org/10.1007/s00267-014-0357-0

Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., y Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, *180*, 60-91.

Salitchev, K. A. (1979). Cartografía. *Pueblo y Educación*.

Shano, L., Raghuvanshi, T. K., y Meten, M. (2020). Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques–a review. *Geoenvironmental Disasters*, *7*(1), 1-19. https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0

Sierra, R. (2013). *Patrones y factores de deforestación en el Ecuador continental, 1990-2010. Y un acercamiento a los* próximos *10 años.* Quito, Conservación Internacional Ecuador y Forest Trends.

Wang, Y., Kang, L., Wu, X., y Xiao, Y. (2013). Estimating the environmental Kuznets curve for ecological footprint at the global level: A spatial econometric approach. *Ecological Indicators*, *34*, 15-21. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.03.021

Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. *CATENA*, *72*(1), 1-12. https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.01.003

Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A. C., y Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *CATENA*, *85*(3), 274-287. https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.014



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 22-29

Monitoreo de la deformación del complejo volcánico de Santorini aplicando interferometría PSDS SAR (2015-2021) usando imágenes Sentinel 1 SAR

I. Castro-Melgar[1,2], T. Gatsios[2,3], J. Prudencio[1,4], J. Ibáñez[1,4], I. Parcharidis[2]

[1] Departamento de Física Teórica y del Cosmos, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Av.de Fuente Nueva, s/n, 18071 Granada (España).
[2] Department of Geography, Harokopio University of Athens, El. Venizelou, 70, 17671 Kallithea (Greece)
[3] Department of Geophysics and Geothermy, National and Kapodistrian University of Athens, Panepistimiopolis – Zographou, 15784 Athens (Greece)
[4] Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada, Profesor Clavera 12, 18071 Granada (España).

icastro@correo.ugr.es

RESUMEN: El arco volcánico heleno es una región volcánica activa que ha de ser estudiado para su vigilancia. La isla de Santorini ha sido monitoreada para conocer la distribución espacial de la deformación desde 1992. Los satélites de Observación de la Tierra (EO) juegan un papel muy importante en el objetivo de monitorear el peligro de los volcanes. La Interferometría SAR es una técnica que puede proporcionar a las autoridades de protección civil, así como a los investigadores científicos información sobre la peligrosidad volcánica, conocimiento sobre el estado de un volcán para que puedan actuar, así como un sistema de alerta que contribuya a mitigar el impacto. En el presente trabajo se ha realizado un estudio de la deformación del complejo volcánico de Santorini entre marzo de 2015 y mayo de 2021 mediante la aplicación de la interferometría SAR Multitemporal (MT-InSAR) y específicamente el método Interferometric Point Target Analysis (IPTA), utilizando 173 imágenes Sentinel 1 A/B SAR SLC en órbita ascendente. Los resultados de velocidad de desplazamiento en los scatterers explotados por el método IPTA muestran un rango de deformación de ±3 mm/año, indicando que la región volcánica atraviesa un periodo de reposo, al menos durante el período cubierto por el conjunto de datos SAR en este estudio, después de un periodo de actividad entre 2010-2012.

Palabras-clave: vigilancia volcánica, InSAR, deformación, Santorini

1. INTRODUCCIÓN

El Mediterráneo es una región con una alta actividad sísmica y tectónica dado que está localizado en una zona de límite de placa. En esta área la placa africana subduce debajo de la placa euroasiática provocando actividad volcánica. En Italia hay docenas de volcanes, permaneciendo algunos de ellos activos, o incluso muy activos, como el caso de Stromboli en las Islas Eolias o el Monte Etna en la Isla de Sicilia. En Grecia los volcanes se concentran en el arco volcánico del Egeo sur, estos son Sousaki, Methana, Milos, Santorini, Kolumbo y Nysiros (Figura 1). El complejo volcánico de Santorini es el más importante, la última gran erupción tuvo lugar hace 3600 años, evento que se consideró como una de las erupciones más importantes en tiempos históricos (Friedrich et al., 2006; Druitt et al., 2012). Desde ese momento, distintas erupciones han tenido lugar en el volcán, formando las islas de Palea Kameni y Nea Kameni, siendo el evento volcánico más reciente en el año 1950. El volcán submarino de Kolumbo está situado al NE de la caldera de Santorini y erupcionó en el año 1650 (Fouqué 1879; Chiodini et al. 1996; Dominey-Howes et al. 2000; Nomikou et al. 2012), siendo el último periodo de reactivación en 2011, con una importante actividad sísmica y deformación en el terreno (Papageorgiou et al., 2012), aunque no llegó a existir erupción. Este evento fue monitorizado mediante distintas metodologías, utilizando técnicas interferométricas se comprobó que hubo un levantamiento de la superficie que alcanzó los 14 cm en el área del Cabo Skaros y 9 cm en Nea Kameni (Foumelis et al., 2013).

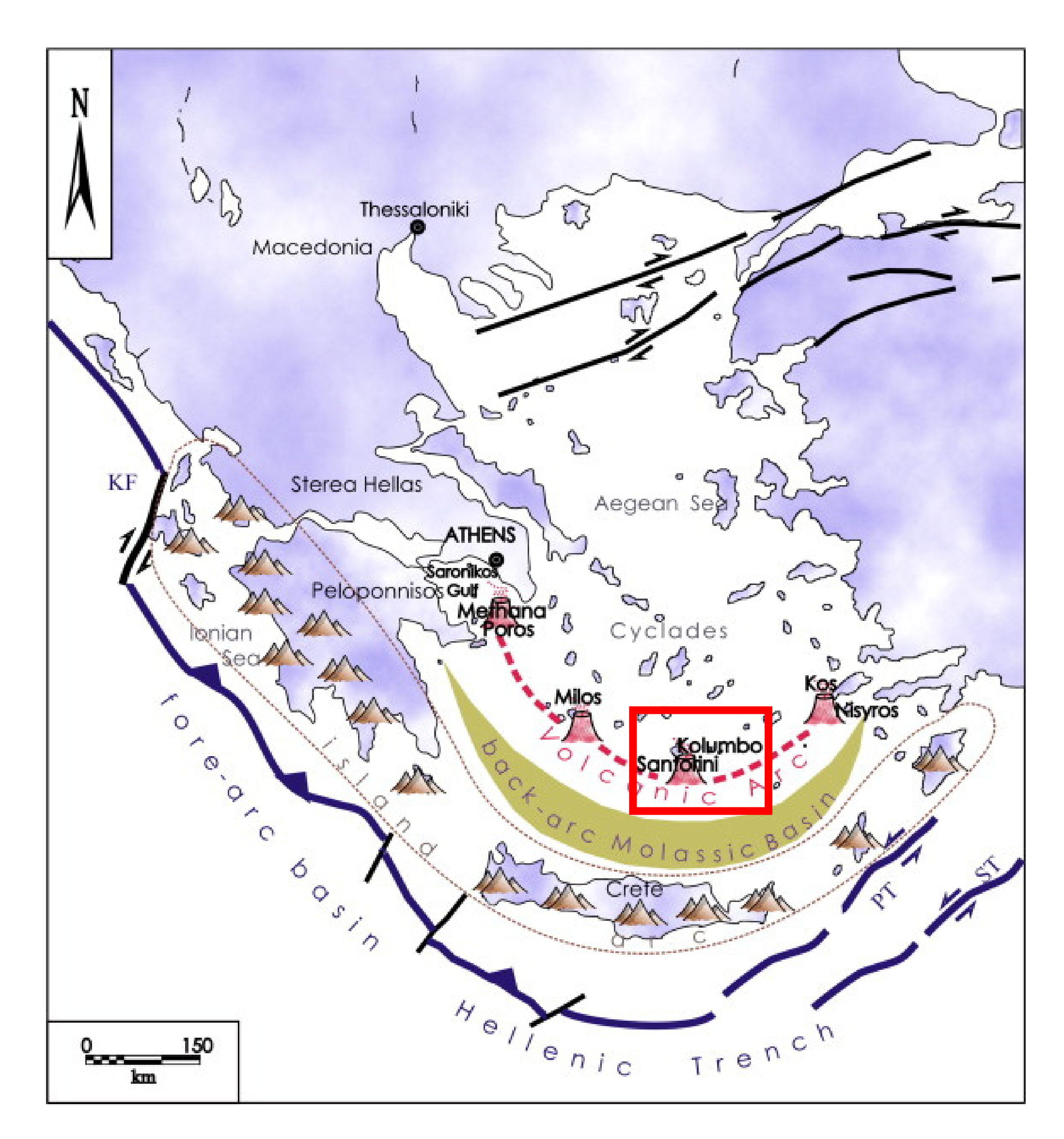


Figura 1. Mapa de Grecia, el arco volcánico heleno y la situación del complejo volcánico de Santorini dentro del cuadrado rojo. Figura modificada de Nomikou et al. (2012).

El origen de la actividad volcánica en el complejo volcánico de Santorini ha sido muy debatido por la comunidad científica, en este sentido Chiodini et al. (1996) describieron dos cámaras magmáticas bajo Nea Kameni y Kolumbo a través de un estudio sismológico. Para el último episodio volcánico se han propuesto dos modelos para explicarlo, el primer modelo está basado en diversos estudios geodésicos que señalan la existencia de una sola fuente de inflación a partir de una intrusión magmática localizada en la zona norte de la caldera, a 3-4 km de profundidad (Newman et al., 2012; Foumelis et al., 2013; Papoutsis et al., 2013 and Lagios et al., 2013). El segundo modelo establece la existencia de dos intrusiones magmáticas, y se basa en el estudio de Saltogianni et al. (2014) a partir de datos GPS. El cuerpo magmático superficial debajo de Santorini está regulado mediante intrusiones de magma episódicas. Parks et al. (2012) y Hooper (2012) señalan que entre enero de 2011 y abril de 2012 hubo una intrusión en pulsos cortos de un volumen magmático significativo al cuerpo superficial. Desde el episodio de 2011-2012 se han realizado estudios de monitoreo, tanto sísmicos como geodésicos, que confirman que no ha habido más actividad (Foumelis et al., 2013; Papageorgiou et al., 2018; 2019). El comportamiento que experimenta el complejo volcánico de Santorini, donde se intercalan periodos prolongados de inactividad con otros periodos de actividad leve sin llegar a erupcionar, es común en otros volcanes como es el caso de Campi Flegrei en Italia (Del Gaudio et al., 2010) o Yellowstone en Estados Unidos (Wicks et al., 2006) entre otros.

Las nuevas tecnologías y herramientas en protección civil tienen como objetivo apoyar la toma de

decisiones de alto nivel y mejorar las capacidades de gestión de desastres de todos los actores de protección civil. Los satélites de observación de la Tierra tienen un papel importante que desempeñar para contribuir a la comprensión, mitigación, preparación y gestión de riesgos naturales o aquellos inducidos por el hombre. Reducir el impacto de los desastres naturales o antropogénicos resulta fundamental de la investigación. Uno de los objetivos finales es predecir la deformación del suelo en el tiempo y en el espacio, y la protección contra los daños causados por la erupción de un volcán, las posibilidades de éxito son altas hoy en día porque la interferometría SAR espacial es una técnica establecida que proporciona una precisión de estimación de deformación muy alta (Torres et al., 2012; Foumelis et al., 2013).

2. METODOLOGÍA

2.1. Datos

En este estudio se han utilizado 173 imágenes SAR de órbita ascendente adquiridas por la constelación Copernicus Sentinel-1 (Sentinel-1A, Sentinel 1-B). Todas las imágenes SAR se obtuvieron en el modo de imagen *Interferometric Wide Swath* (IW). El modo IW se basa en la estrategia de observación del terreno con escaneos progresivos (TOPS) (Torres, 2012). Las imágenes IW SAR se componen de tres subfranjas, cada una de las cuales consta de una secuencia de ráfagas que proporcionan una cobertura de 250 km de ancho, con una resolución de 5 m de píxeles en el rango y una resolución de 20 m de píxeles en la dirección del acimut (Berger, 2012). Los datos SAR seleccionados para este estudio se obtuvieron de la plataforma Sentinel Hub. Los datos de Sentinel-1 cubren el período comprendido entre marzo de 2015 y mayo de 2021 (Figura 2).

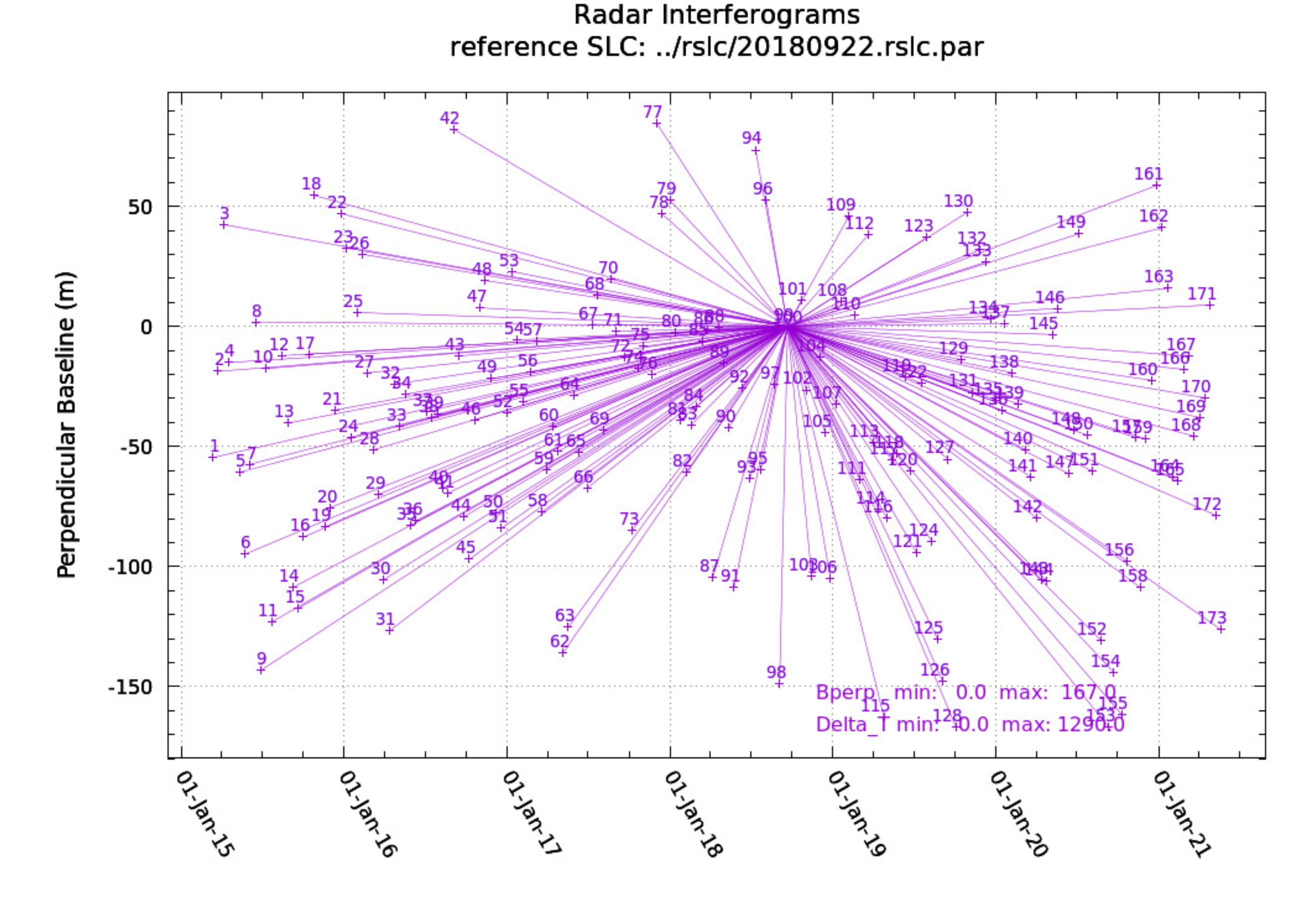


Figura 2. Gráfico de estrella de las imágenes SAR usadas en el procesamiento MT-InSAR para la órbita ascendente.

2.2. Procesamiento MT-InSAR

El procesamiento interferométrico se realizó utilizando el software GAMMA (GAMMA Remote Sensing

AG, Gümligen, Suiza) y el método *Interferometric Point Target Analysis* (IPTA) (Wener, 2003). El preprocesamiento y el procesamiento principal utilizando GAMMA/IPTA fueron los dos procesos que se utilizaron en el flujo de trabajo para el procesamiento MT-InSAR (Figura 3).

Hay distintas poblaciones en Santorini, como Thera, Imerovigli, Oia, Kamari o Akrotiri. Estos asentamientos tienen muchos edificios que podrían retrodispersar la señal del radar de manera energética y coherente, por lo que se pueden caracterizar como *Persistent Scatterers* (PS). Sin embargo, hay otras áreas que son predominantemente rurales y no hay suficientes PS. En esas áreas, también hay algunos objetos que pueden dispersar la señal de radar más energética y coherente que su entorno, por lo que pueden usarse en nuestro análisis *Distributed Scatterers* (DS). Se ha seleccionado el método IPTA porque es un método híbrido que utiliza tanto los PS como los DS para lograr un monitoreo del desplazamiento efectivo utilizando datos SAR SLC. Este método, exige una cantidad significativa de potencia informática y tiempo de procesamiento (Shamshiri, 2018).

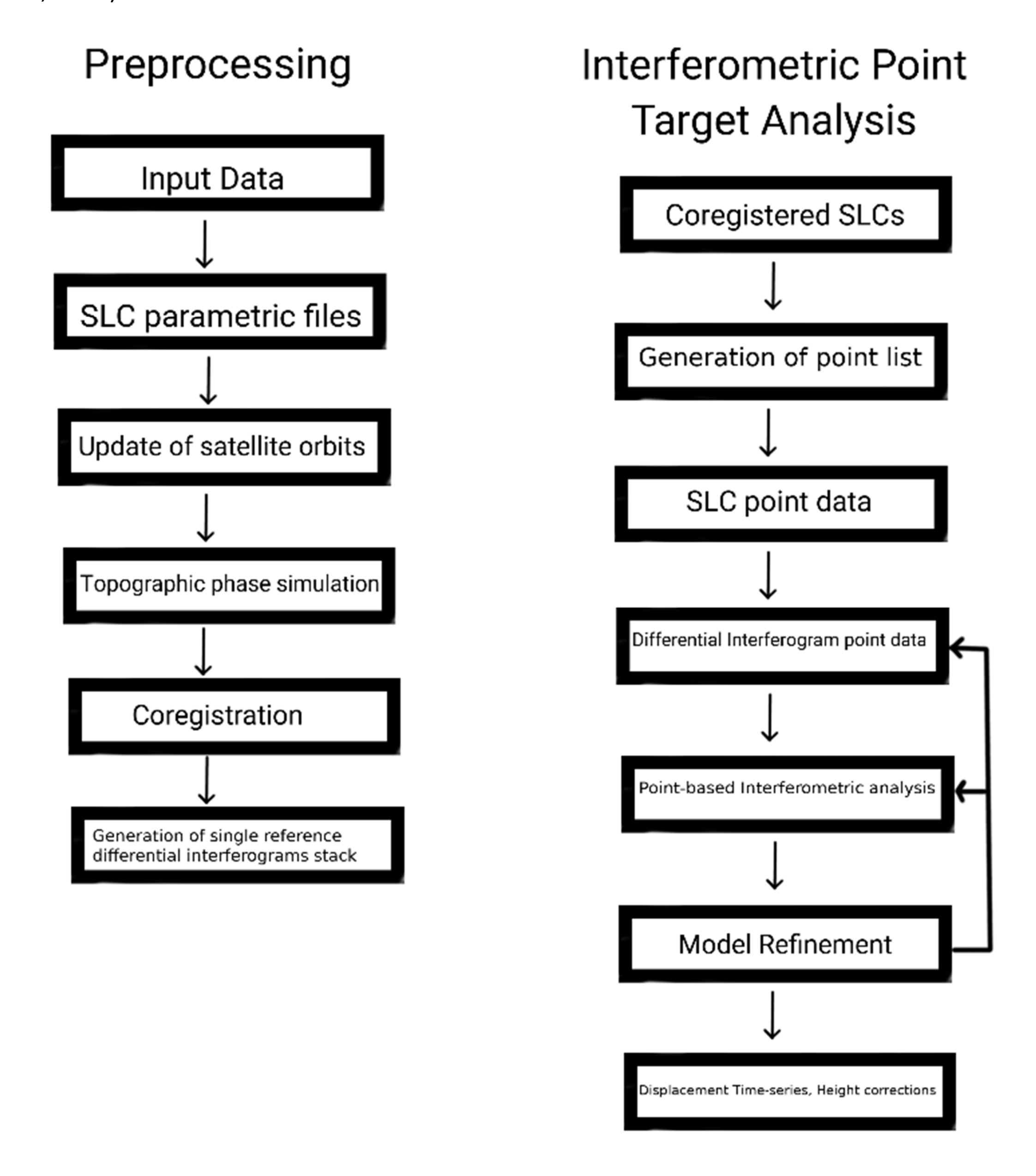


Figura 3. Flujo de trabajo del preprocesamiento y procesamiento del método IPTA.

Los archivos paramétricos para las 173 imágenes SLC de órbita ascendente se prepararon durante el

preprocesamiento y se utilizaron para lograr el refinamiento orbital. Las imágenes se registraron conjuntamente, utilizando como referencia la imagen SAR de 22/09/2018, lo que resultó una pila de 172 interferogramas diferenciales. Para eliminar la contribución topográfica de los interferogramas se utilizó un Modelo de Elevación Digital (DEM) de 1-arcsec (30 m/píxel) obtenido por la *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (Farr, 2007).

El primer paso del procesamiento IPTA fue la generación de una pila de imágenes referenciadas para el conjunto de dos, que contienen las fases interferométricas *single-look* y *multi-look*. Posteriormente se generaron una lista de puntos utilizando la variabilidad temporal de la intensidad de las imágenes SLC y filtros de baja diversidad espectral. La pila constó de 439 interferogramas diferenciales con una línea base perpendicular máxima de 214 m. Los interferogramas diferenciales se generaron emparejando cada imagen con cualquier otra que tuviese menos de 40 días de diferencia. El punto de referencia se seleccionó en la zona del aeropuerto, considerada como el área más estable de la isla principal.

A continuación, usando la lista de puntos generada anteriormente, se estimaron las correcciones de altura y las fases atmosféricas, dando como resultado un modelo de deformación. Este modelo se perfeccionó mediante un proceso de iteración. Posteriormente, las fases de deformación de la superficie se convirtieron en una serie temporal de deformación, incluyendo por un lado tanto los PS como los DS, y por otro, de manera independiente, los PS y los DS.

Para la validación de los resultados, al no contar con acceso a datos GNSS, durante la conversión de las fases interferométricas en una serie temporal de deformación, se utilizó un enfoque conservador, asumiendo que la deformación es temporalmente suave. Para garantizar que los resultados sean precisos, se ha utilizado un umbral de coherencia muy alto (0.8). Además, la calidad del desenvolvimiento se ha mejorado mediante desenvolvimientos consecutivos, rechazando cada vez los puntos de valor poco fiables, utilizando como umbral valores de desviación estándar cada vez más bajos. Además, como validación externa, se comprobó que nuestros resultados son coherentes con los obtenidos por otros autores como Papageorgiou et al. (2018; 2019).

3. RESULTADOS

Después del procesamiento MT-InSAR, se contaron con 16802 objetivos PS y 10997 objetivos DS. La superficie de la isla de Thira alcanza los 76,19 km^2, la de Therasia 9,73 km^2 y la de Nea Kameni 3,4 km^2, por lo que se considera un área total de 88,89 km^2. Las densidades espaciales de los objetivos para el complejo volcánico de Santorini son 189 PS/km^2 y 123,7 DS/km^2. Los objetivos DS cubren prácticamente la totalidad de las islas, como se esperaba en el modelo. La isla de Thira tiene un número muy alto de objetivos PS (11677), que cubren de forma intermitente casi toda la isla. Las áreas con mayor presencia de objetivos se ubican en la zona oeste y en el sureste, coincidiendo con áreas pobladas y formaciones geológicas que presentan alta coherencia, como por ejemplo volcanoclastos. Los objetivos PS cubren toda la isla de Nea Kameni, que tiene un suelo rocoso que favorece la aparición de *scatterers*. En la isla de Therasia, la mayoría de los objetivos se encuentran en la parte sur de la isla. La coherencia de los objetivos de PS es igual o superior a 0,80, mientras que los objetivos DS cuentan con una coherencia igual o superior a 0,70.

Los resultados de velocidad de desplazamiento tanto de PS como DS (Figura 4) destacan que la mayoría de los *scatterers* muestran un rango de deformación ±3 mm/año. En el mapa de DS, existen ciertas zonas de las islas donde es posible ver agrupaciones de *scatterers* con velocidad LOS entre -7 y -3 mm/año, sin embargo, al no ser confirmados en el mapa de PS no son considerados significativos. Los resultados aquí presentados no revelan ningún patrón de deformación significativo entre marzo de 2015 y mayo de 2021.

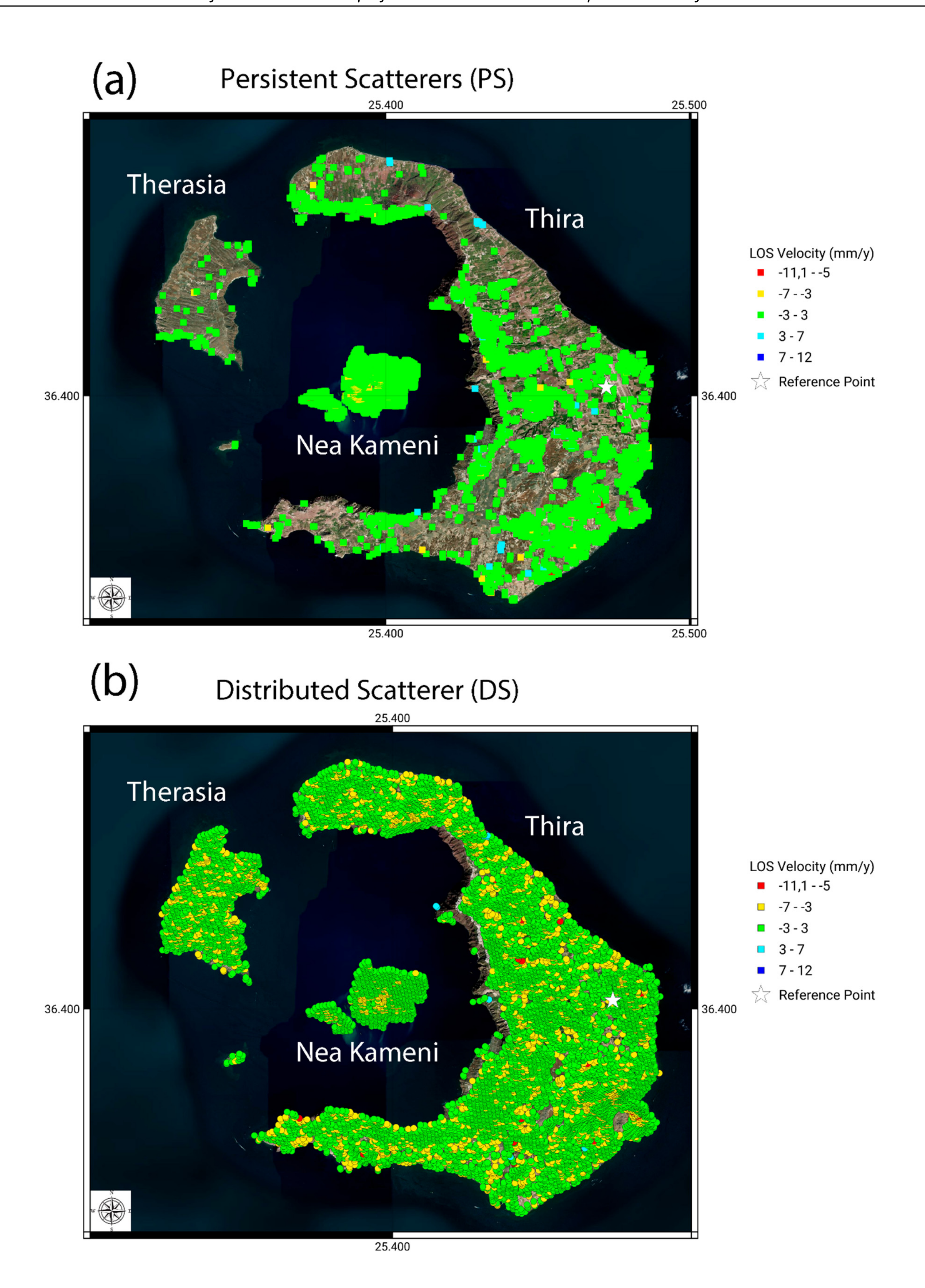


Figura 4. Velocidad de desplazamiento de InSAR *line-of-sight* (LOS) entre marzo de 2015 y mayo de 2021 en órbita ascendente para PS (a) y DS (b).

4. CONCLUSIONES

La interferometría SAR es una técnica que puede proporcionar a las autoridades de protección civil y a la comunidad científica conocimiento sobre el estado de un volcán y actuar de esta manera como un sistema de alerta que contribuya a mitigar el impacto (Castro-Melgar et al., 2021). Los resultados de este estudio muestran que el complejo volcánico de Santorini, después de un periodo de actividad entre 2010 y 2012 (Stiros et al., 2010; Papageorgiou et al., 2012; Parks et al., 2012; Papazachos et al., 2012; Foumelis et al., 2013; Papoutsis et al., 2013; Lagios et al., 2013; Newman et al., 2012), está actualmente en una fase de reposo, al menos durante el periodo cubierto por el conjunto de datos SAR. Los resultados obtenidos de este estudio son consistentes con los resultados de otros equipos de investigación (Papageorgiou et al., 2018; 2019).

5. BIBLIOGRAFÍA

Berger, M., Moreno, J., Johannessen, J. A., Levelt, P. F., y Hanssen, R. F. (2012). ESA's sentinel missions in support of Earth system science. *Remote Sensing of Environment*, *120*, 84-90. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.023

Castro-Melgar. I., Prudencio, J., Ibáñez, J., Gatsios, T. y Parcharidis, I. (2021). Operational monitoring of a volcano before entering in unrest phase using Sentinel 1 DINSAR and MTINSAR: the case of La Palma volcanic island. In *SafeGreece 2021 on-line Proceedings*. Greece, 24–26 November 2021

Chiodini, G., Cioni, R., Dim Paola, M., Dotsika, E., Fytikas, M., Leonis, C., Liberopoulou, V., Magro, G., Marini, L., Michelot, J. L. y Raco, B. (1996). Fluid geochemistry for the surveillance of Thera Island. *Final report*, *6*

Del Gaudio, C., Aquino, I., Ricciardi, G. P., Ricco, C., y Scandone, R. (2010). Unrest episodes at Campi Flegrei: A reconstruction of vertical ground movements during 1905–2009. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *195*(1), 48-56. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.05.014

Dominey-Howes, D. T. M., Papadopoulos, G. A., y Dawson, A. G. (2000). Geological and historical investigation of the 1650 Mt. Columbo (Thera Island) eruption and tsunami, Aegean Sea, Greece. *Natural Hazards*, *21*(1), 83-96. https://doi.org/10.1023/A:1008178100633

Druitt, T. H., Costa, F., Deloule, E., Dungan, M., y Scaillet, B. (2012). Decadal to monthly timescales of magma transfer and reservoir growth at a caldera volcano. *Nature*, *482*(7383), 77-80. https://doi.org/10.1038/nature10706

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., y Alsdorf, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of geophysics*, *45*(2). https://doi.org/10.1029/2005RG000183

Fouqué, F. (1879). *Santorin et ses éruptions*. G. Masson

Foumelis, M., Trasatti, E., Papageorgiou, E., Stramondo, S., y Parcharidis, I. (2013). Monitoring Santorini volcano (Greece) breathing from space. *Geophysical Journal International*, *193*(1), 161-170. https://doi.org/10.1093/gji/ggs135

Friedrich, W. L., Kromer, B., Friedrich, M., Heinemeier, J., Pfeiffer, T., y Talamo, S. (2006). Santorini eruption radiocarbon dated to 1627-1600 BC. *Science, 312(5773)*, 548-548. https://doi.org/10.1126/science.1125087

Hooper, A. A volcano's sharp intake of breath. *Nature Geosciences*. 2012, 5, 686-687. https://doi.org/10.1038/ngeo1584

Lagios, E., Sakkas, V., Novali, F., Bellotti, F., Ferretti, A., Vlachou, K., y Dietrich, V. (2013). SqueeSAR™ and GPS ground deformation monitoring of Santorini Volcano (1992–2012): Tectonic implications. *Tectonophysics*, *594*, 38-59. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.03.012

Newman, A. V., Stiros, S., Feng, L., Psimoulis, P., Moschas, F., Saltogianni, V., Jiang, Y., Papazachos, C., Panagiotopoulos, D., Karagianni, E. y Vamvakaris, D. (2012). Recent geodetic unrest at Santorini caldera, Greece. *Geophysical Research Letters*, *39*(6). https://doi.org/10.1029/2012GL051286

Nomikou, P., Carey, S., Papanikolaou, D., Bell, K. C., Sakellariou, D., Alexandri, M., y Bejelou, K. (2012). Submarine volcanoes of the Kolumbo volcanic zone NE of Santorini Caldera, Greece. *Global and Planetary Change*, *90*, 135-151. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.01.001

Papageorgiou, E., Foumelis, M., y Parcharidis, I. (2012). Long-and short-term deformation monitoring of Santorini Volcano: Unrest evidence by DInSAR analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *5*(5), 1531-1537. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2198871

Papageorgiou, E., Foumelis, M., Mouratidis, A., y Papazachos, C. (2018). Sentinel-1 Monitoring of Santorini volcano post-unrest state. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1577-1580). IEEE. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518471

Papageorgiou, E., Foumelis, M., Trasatti, E., Ventura, G., Raucoules, D., y Mouratidis, A. (2019). Multi-sensor SAR geodetic imaging and modelling of Santorini volcano post-unrest response. *Remote Sensing*, *11*(3), 259. https://doi.org/10.3390/rs11030259

Papazachos, C. B., Panagiotopoulos, D., Newman, A. V., Stiros, S., Vougioukalakis, G., Fytikas, M., Laopoulos, T., Albanakis, K., Vamvarakis, D. Karagianni, E., Feng, L., Psimoulis, P. y Moschas, F. (2012). Quantifying the current unrest of the Santorini volcano: Evidence from a multiparametric dataset, involving seismological, geodetic, geochemical and other geophysical data. In *Proceedings of the EGU General Assembly 2012*, Vienna, Austria, 22-27 April 2012.

Papoutsis, I., Papanikolaou, X., Floyd, M., Ji, K. H., Kontoes, C., Paradissis, D., y Zacharis, V. (2013). Mapping inflation at Santorini volcano, Greece, using GPS and InSAR. *Geophysical Research Letters*, *40*(2), 267-272. https://doi.org/10.1029/2012GL054137

Parks, M. M., Biggs, J., England, P., Mather, T. A., Nomikou, P., Palamartchouk, K., Papanikolau, X., Paradissis, D., Parsons, B., Pyle, D. M., Raptakis, C. y Zacharis, V. (2012). Evolution of Santorini Volcano dominated by episodic and rapid fluxes of melt from depth. *Nature Geoscience*, *5*(10), 749-754. https://doi.org/10.1038/ngeo1562

Saltogianni, V., Stiros, S. C., Newman, A. V., Flanagan, K., y Moschas, F. (2014). Time-space modeling of the dynamics of Santorini volcano (Greece) during the 2011–2012 unrest. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *119*(11), 8517-8537. https://doi.org/10.1002/2014JB011409

Shamshiri, R., Nahavandchi, H., Motagh, M., y Hooper, A. (2018). Efficient ground surface displacement monitoring using Sentinel-1 data: Integrating distributed scatterers (DS) identified using two-sample t-test with persistent scatterers (PS). *Remote Sensing*, *10*(5), 794. https://doi.org/10.3390/rs10050794

Stiros, S. C., Psimoulis, P., Vougioukalakis, G., y Fyticas, M. (2010). Geodetic evidence and modeling of a slow, small-scale inflation episode in the Thera (Santorini) volcano caldera, Aegean Sea. *Tectonophysics*, *494*(3-4), 180-190. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.09.015

Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., ... y Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote sensing of environment*, *120*, 9-24. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028

Werner, C., Wegmüller, U., Strozzi, T., Wiesmann, A. Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping. In *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS), Toulouse, France, 21–25 July 2003; Volume 7, pp. 4362–4364.

Wicks, C. W., Thatcher, W., Dzurisin, D., y Svarc, J. (2006). Uplift, thermal unrest and magma intrusion at Yellowstone caldera. *Nature*, *440*(7080), 72-75. https://doi.org/10.1038/nature04507



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 30-39

El futuro del área urbana de Zaragoza: proyecciones de los usos del suelo considerando la zonificación urbanística

D. Domingo[1,2,3], A.M. Hersperger[3]

[1] *EiFAB-iuFOR Campus Universitario Duques de Soria, Universidad de Valladolid, 42004 Soria.*
[2] *Geoforest-IUCA, Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12,50009 Zaragoza España.*
[3] *Land Change Science Research Unit, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Zurcherstrasse 111, 8930 Birmensdorf, Switzerland.*

ddomingo@unizar.es, anna.hersperger@wsl.ch

RESUMEN: Los procesos de urbanización han proliferado en las últimas décadas constituyendo un fenómeno global cuyo planeamiento es esencial para la creación de espacios urbanos sostenibles. La reciente digitalización de los planes de ordenación urbana en España abre nuevas oportunidades para integrar el planeamiento urbano en el modelado de cambios de usos del suelo. El objetivo de esta investigación es la predicción de los usos del suelo futuros considerando diversos escenarios, así como, la información digitalizada de la zonificación del planeamiento urbanístico para el área urbana de Zaragoza. El estudio define cuatro escenarios de cambio para la generación de las proyecciones futuras considerando los objetivos de desarrollo sostenible enmarcados en la agenda urbana de 2030, la legislación vigente, nacional y autonómica. Las proyecciones para las próximas décadas se han realizado utilizando el marco de modelado CLUE Mondo e incorporando información socioeconómica, ambiental, variables de proximidad, así como información de la zonificación urbanística. Los principales patrones de crecimiento se observan en torno a la ciudad de Zaragoza, así como las áreas de crecimiento tradicionales asociadas a los ejes de los ríos Ebro, Gállego y Huerva proporcionando información relevante para la toma de decisiones por parte de los gestores urbanos.

Palabras-clave: dinámica de cambios de uso del suelo urbano, zonificación, escenarios, CLUMondo.

1. INTRODUCCIÓN

La transformación de áreas rurales en espacios urbanizados genera cambios de usos del suelo con repercusiones medioambientales y socioeconómicas de primer orden (Xu et al., 2016). Los procesos de urbanización han proliferado en las últimas décadas constituyendo un fenómeno global cuyo planeamiento es esencial para la creación de espacios urbanos sostenibles. La sostenibilidad urbana ha sido reconocida en los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas, así como en sus trasposiciones a escala europea y nacional. En España, la Agenda Urbana establece que el planeamiento urbano debe abogar por un uso racional del suelo revitalizando las áreas urbanas existentes y evitando la expansión urbana dispersa. En este sentido, la definición e implementación del planeamiento urbano puede prevenir la degradación del territorio y mantener la compacidad de las áreas urbanas (Domingo et al., 2021), evitando procesos de expansión urbana sin precedentes como los asociados a la crisis económica de 2008 (Díaz-Pacheco y García-Palomares, 2014; Varela-Candamio et al., 2019).

La proyección de los usos del suelo urbanos para las próximas décadas, considerando diferentes escenarios socio-económicos, proporciona información relevante para los gestores y planificadores urbanos dado que permite explorar nuevos desarrollos potenciales (Karakus et al., 2015). La definición de escenarios integrados en modelos de simulación de cambios de uso del suelo posibilita estudiar la magnitud y potenciales patrones espaciales de cambios futuros (Verburg et al., 2008) así como evaluar propuestas de planificación presentes o venideras. Es por ello que la integración del planeamiento urbano en los modelos de simulación del suelo puede mejorar notoriamente la precisión de las simulaciones (Onsted y Chowdhury, 2014).

Aunque el planeamiento urbano rara vez es considerado en el modelado de usos del suelo puede implementarse utilizando restricciones duras o graduales (Hersperger et al., 2018). Existen algunos ejemplos de inclusión de las políticas de planeamiento urbano en los cambios de uso del suelo (Lin y Li, 2019; Y. Zhou et

al., 2020), si bien asociadas a los límites de la planificación sin considerar la heterogeneidad espacial interna mediante patrones como la densidad de población o de edificación (van Vliet et al., 2019). La reciente digitalización de los planes de ordenación urbana en España, concretamente en cuanto a la zonificación se refiere, abre nuevas oportunidades para integrar el planeamiento urbano en el modelado de cambios de usos del suelo. El objetivo de esta investigación es la predicción de los usos del suelo futuros considerando diversos escenarios, así como, la información digitalizada de la zonificación del planeamiento urbanístico para el área urbana de Zaragoza.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio está constituida por el área urbana funcional de Zaragoza incluyendo la ciudad y su área de influencia según se define en el Atlas Digital de las Áreas Urbanas de España. El área urbana de Zaragoza tiene una población de 761.850 habitantes (2020, INE) siendo la octava área urbana de España más poblada. Localizada en el noreste de España consta de 2.205 km^2 y se divide en 15 municipios, siendo la ciudad de Zaragoza la que alberga en torno al 90% de la población total. Desde 1990 el área edificada se ha incrementado a una tasa anual del 3,87% mientras que la población ha crecido a un ritmo de 0,8% anual (INE), lo cual ha generado que el crecimiento urbano haya superado con creces la demanda de suelo habitable. Como establece De Miguel (2014) los precios del suelo menores en los municipios próximos a la ciudad de Zaragoza han generado que durante las últimas décadas el incremento de la urbanización haya sido notable.

2.2. Enfoque basado en escenarios para la simulación de cambios de uso del suelo

El modelado de usos del suelo futuro se realizó utilizando un enfoque basado en escenarios con CLUMondo. El marco de modelado CLUMondo permite integrar factores explicativos espaciales y demandas a escala regional para simular los cambios de usos del suelo en el futuro incluyendo métodos de autómatas celulares y modelos de probabilidad (Van Asselen y Verburg, 2013). Se consideraron factores explicativos a escala local, demandas futuras para integrar los efectos regionales y restricciones en la localización de los usos del suelo futuros asociadas a la zonificación urbana. Las simulaciones se realizaron para el año 2030 considerando que es el periodo objetivo de la Agenda Urbana Española y de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. La simulación con CLUMondo requiere la siguiente información: una cartografía base de usos del suelo que en el presente estudio refiere al Atlas Europeo de Áreas Urbanas para el año 2012 (véase 2.3); demanda anual asociada a los distintos escenarios (véase 2.4), la matriz de conversión para permitir o restringir las transiciones entre usos del suelo (Tabla 2), y modelos de probabilidad de localización para cada uno de los tipos de usos del suelo (véase 2.5). Las simulaciones se realizaron de 2012 a 2018 para validar la precisión de las mismas, y posteriormente se simularon los cambios de usos del suelo hasta el año 2030.

2.3. Cartografía de uso del suelo y factores explicativos

La cartografía base de uso del suelo se basa en el Atlas Europeo de Áreas Urbanas para los años 2012 y 2018. La cartografía se transformó a ráster con una resolución de 30 m considerando el valor central y se reclasificó en 15 clases (Tabla 1).

Los factores explicativos se agrupan en tres grupos frecuentemente utilizados para la simulación de usos del suelo (Zhou et al., 2020): ambientales, socio-económicos y de proximidad (Tabla 4). Todos los factores se calcularon en formato ráster a 30 m de resolución, concordando con la cartografía de usos del suelo. Se calcularon ocho factores ambientales: elevación, pendiente, orientación, precipitación, radiación solar, geología, distancia a las zonas inundables y áreas protegidas comúnmente utilizados para el modelado de usos del suelo a diversas escalas (Price et al., 2015). En cuanto a los factores socioeconómicos se incluyeron cinco variables: densidad de población y viviendas, número de empresas, número de personas empleadas y tiempo requerido para ir al trabajo. Finalmente, se calcularon diez variables de proximidad utilizando funciones de distancia euclidiana frecuentemente utilizadas (Liang et al., 2018): distancia a carreteras, a calles, a zonas verdes, a paradas de transporte público, a líneas de bus, a líneas de trenes, a zonas con o sin proyecto de urbanización según el planeamiento urbanístico, al centro de ciudades o asentamientos.

2.4. Escenarios: definición y cuantificación

Se definieron cuatro escenarios de cambios de uso del suelo futuro en torno a dos ejes principales: i) visión de mercado frente a intervención en el planeamiento urbanístico; ii) crecimiento económico a corto plazo frente a crecimiento sostenible con visión a medio-largo plazo.

Tabla 1. Clases originales y reclasificadas del Atlas Europeo de Áreas Urbanas para los años 2012 y 2018.

Usos del suelo según el Atlas Europeo de Áreas Urbanas (nombres originales en inglés)	*Usos del suelo reclasificados y abreviatura*
Continuous urban fabric (Sealing layer > 80%)	Urbano continuo (UC)
Discontinuous dense urban fabric (Sealing layer 50% - 80%)	Urbano denso (UD)
Discontinuous medium density urban fabric (Sealing layer 30% - 50%)	Urbano con densidad media (UMD)
Discontinuous low-density urban fabric (Sealing layer 10% - 30%)	Urbano de baja densidad (UBD)
Discontinuous very low-density urban fabric (Sealing layer < 10%)	Urbano disperso o con muy baja densidad (UMBD)
Industrial, commercial, public, military and private units	Industrial (Ind.)
Isolated structures	
Sport and leisure facilities	
Airports	Aeropuerto (Aero.)
Mineral extraction and dump sites	Áreas en construcción (Const.)
Construction sites	
Land without current use	
Open spaces with little or no vegetation	
Green urban areas	Zonas verdes (ZV)
Arable land (annual crops)	Cultivos (Cult.)
Permanent crops (vineyards, fruit trees, olive groves)	
Pastures	Pastos (Past.)
Forests	Bosques (Bosq.)
Herbaceous vegetation associations	Pastizales naturales (Herb.)
Wetlands	Reservorios de agua (Agua)
Water	
Fast transit roads and associated land	Carreteras (Carret.)
Other roads and associated land	
Railways and associated land	

El escenario 1 (E1) denominado escenario de desarrollo sostenible se caracteriza por un crecimiento limitado a las áreas en desarrollo según la zonificación urbana, una inversión en capital asociado con empresas locales y una conciencia ecológica alta, incluyendo la conservación de áreas protegidas, zonas fluviales y entornos agrícolas de proximidad. El escenario 2 (E2) es el comúnmente conocido como "*bussiness-as-usual*" asociado a un crecimiento urbano según las tendencias actuales que se desarrollará en áreas en las que existe proyecto de urbanización, con un crecimiento poblacional según las tendencias del INE y una conciencia ecológica media que respeta las áreas protegidas y las llanuras de inundación fluviales. El escenario 3 (E3), de fuerte desarrollo urbanístico caracterizado por la presencia de inversión en capital internacional, con un crecimiento poblacional mayor a las tendencias actuales y un bajo grado de preocupación por el medio ambiente. Se permite la construcción en áreas que no tengan proyecto de urbanización desarrollado según la zonificación urbana. El escenario 4 (E4) denominado de desarrollo no restringido está basado en una liberalización del mercado y un incremento del área urbanizada superior a la demanda poblacional, emulando una burbuja inmobiliaria y con una planificación urbana casi inexistente.

La cuantificación de los escenarios se asocia a la definición de las demandas, población y superficie construida, y las restricciones espaciales asociadas a la zonificación urbanística. La cuantificación de los escenarios se realizó en tres pasos: i) cuantificación de las demandas iniciales, ii) definición de las restricciones espaciales con tres tipos de densidades urbanas, iii) cuantificación de las demandas futuras. La cuantificación de las demandas iniciales de población y área construida se determinó para cada tipo de uso del suelo utilizando la información del catastro y de densidad de población del censo de 2011 (INE).

La definición de las restricciones espaciales se basó en la zonificación urbana para áreas urbanas e

industriales en los escenarios E1-E3, mientras que el E4 se asume una intervención muy leve del planeamiento urbanístico. Los planes de zonificación utilizados constituyen una versión armonizada de los actuales planes de ordenación urbana municipales desarrollados por el Sistema de Información Urbana (SIU). Estos planes definen áreas urbanizables delimitadas que constan de un proyecto de urbanización y no delimitadas para aquellas en las que el proyecto de urbanización todavía está sin realizar. Además, definen el suelo no urbanizable como aquel asociado a áreas en las que no se puede realizar una construcción para uso residencial. Las restricciones espaciales se establecieron con tres tipos de densidades urbanas (baja, media y alta), basándose en los valores máximos de área urbana edificable establecidos en la zonificación urbana recogiéndose en la matriz de transiciones (Tabla 2). Para determinar los umbrales entre las tres densidades de urbanización se emplearon los valores medios existentes en 2012. Concretamente, el valor medio de área edificada en los tipos de uso del suelo urbano continuo y denso se utilizó para definir las áreas con alta densidad. El valor medio del área edificada en el tipo de uso del suelo urbano con densidad media se utilizó para definir las áreas con densidad media. Por último, el valor medio del área edificada en los tipos de uso del suelo baja densidad y disperso se utilizó para determinar el umbral de densidad baja. Dichos umbrales se aplicaron para los E1 y E2. En el caso del E3, puesto que se permite la construcción en áreas sin proyecto de urbanización, se asignaron las densidades de los polígonos de zonificación más próximos, basándonos en las hipótesis de autocorrelación espacial (Dungan et al., 2002), mediante análisis SIG e interpretación visual con ortofotos del PNOA. El E4 asume una planificación muy leve, y permite la edificación con densidades medias en torno a las áreas previamente urbanizadas. Para ello se definió un buffer adaptativo que estableciera un máximo de área edificable cuyo valor se determinó mediante interpolación linear del porcentaje de áreas con densidad alta y media en los E1 a E3. En el resto de la zona de estudio se permitió una urbanización con densidad baja.

Tabla 2. Transiciones permitidas entre usos del suelo para los distintos escenarios. Las abreviaturas de los usos del suelo refieren a las establecidas en la Tabla 1. En paréntesis se recogen las transiciones para el E4 en aquellos casos que son diferentes de los E1 a E3. El valor 1 refleja que el cambio es permitido; el valor 0 restringido; el valor 110 que el cambio es permitido después de 10 años; los valores 17 a 19 definen que las áreas urbanizadas deben tener baja, media o alta densidad, respectivamente; el valor 20 permite establecer el tipo de uso de suelo industrial.

	UC	*UD*	*UMD*	*UBD*	*UMBD*	*Ind.*	*Aero.*	*Const.*	*ZV*	*Cult.*	*Past.*	*Bosq.*	*Herb.*	*Agua*	*Carret.*
UC	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UD	19 (0)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UMD	19 (0)	19 (0)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UBD	19 (0)	19 (0)	18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UMBD	19 (0)	19 (0)	18	17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ind.	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aero.	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Const.	19 (0)	19 (0)	18	17	17	20 (1)	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ZV	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Cult.	19 (0)	19 (0)	18	17	17	20 (1)	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Past.	19 (0)	19 (0)	18	17	17	20 (1)	0	0	0	1	1	110	0	0	0
Bosq.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
Herb.	19 (0)	19 (0)	18	17	17	20 (1)	0	0	0	1	0	110	1	0	0
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Caret.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

La cuantificación de las demandas futuras para el caso del área construida se basó en demandas históricas y literatura previa (Tabla 3). La tendencia de bajo crecimiento tras la explosión de la burbuja inmobiliaria de 2008 se utilizó para caracterizar el E1. El E2 incluye la tendencia de 1990-2019 caracterizada por cambios legislativos y sociales con un incremento medio tras la entrada de España en la Unión Europea (Díaz-Pacheco y García-Palomares, 2014). El E3 se asocia al crecimiento económico tras 1975 (1975-2019) asociado a un crecimiento poblacional elevado (Marroquin et al., 2013). El S4 emula la última burbuja inmobiliaria 2000-2008 con una expansión sin precedentes (Díaz-Pacheco y García-Palomares, 2014). Las demandas de población para el E1 y E2 concuerdan con las proyecciones del INE para 2033. En el caso del E3 y E4 se consideraron los incrementos poblacionales en los mismos periodos utilizados para el área urbana 1975-2019 y 2000-2008, respectivamente.

Tabla 3. Porcentaje relativo en el cambio de las demandas de área construida y población entre 2012 y 2030 para los distintos escenarios en el área urbana de Zaragoza.

	E1	*E2*	*E3*	*E4*
Área construida	108,2	124,6	124,9	136,1
Población	101,5	101,5	104,6	124,0

2.5. Modelos de probabilidad de localización, simulación futura y validación

La probabilidad de localización de los distintos usos del suelo se estimó a escala de píxel mediante modelos de regresión logística multivariante que relacionaran la distribución de los usos del suelo para un punto en el tiempo, en nuestro caso el año 2012, y los distintos factores explicativos (Price et al., 2015). Previo a la realización de los modelos se seleccionaron muestras aleatorias de presencias y ausencias de forma aleatoria para cada uno de los tipos de uso del suelo considerando su frecuencia o representatividad en el área de estudio y una distancia mínima de dos píxeles entre muestras para evitar la auto correlación espacial (Dungan et al., 2002). El número máximo de presencias y ausencias se estableció en 3000, el cual se aplicó en aquellos usos del suelo con gran representatividad en el área de estudio. Se realizó un modelo de regresión logística para cada uno de los tipos de usos de suelo, seleccionando aquellos factores más explicativos y su precisión se estimó utilizando el estadístico de área bajo la curva (AUC) (Pontius y Schneider, 2001).

La simulación de usos del suelo se realizó en el marco de modelado CLUMondo que permite incluir distintas demandas al mismo tiempo así como restricciones espaciales (Van Asselen y Verburg, 2013). CLUMondo utiliza la probabilidad de localización estimada con modelos de regresión logística multivariante, las demandas de población y área edificada asociada a cada escenario, las restricciones asociadas a la zonificación del planeamiento urbano y ajustes específicos de conversión entre los distintos usos del suelo. La zonificación se integró mediante capas espaciales para restringir el desarrollo urbano e industrial con distintas intensidades en los nuevos desarrollos urbanos para cada uno de los escenarios. Además, las restricciones se incluyeron en la matriz de conversión (Tabla 2) para restringir espacialmente la conversión en usos del suelo específicos.

En primer lugar, realizamos simulaciones de cambios de uso desde el año 2012 para predecir los usos del suelo en 2018. A continuación validamos los resultados de la simulación basándonos en la precisión en la localización a escala de píxel (Pontius et al., 2018) y en los patrones de usos del suelo simulados según el método de Power et al. (2001) que considera que pequeños desplazamientos en los píxeles no generan desacuerdos si los patrones de uso del suelo simulados son esencialmente los mismos. La validación a escala de píxel se realizó comparando los usos del suelo del Atlas Europeo de Áreas Urbanas de 2012 con los del Atlas Europeo de Áreas Urbanas de 2018 y la simulación para 2018 según Pontius et al., (2008). La precisión de la simulación se calculó utilizando las siguientes estadísticas: aciertos, falsas alarmas, errores, y rechazos correctos (Pontius et al., 2018). Además, se calcularon los porcentajes de píxeles bien clasificados y el acierto global. La validación a escala de patrones se utilizó para comparar los usos del suelo del Atlas Europeo de Áreas Urbanas de 2018 respecto a los usos del suelo simulados en 2018 utilizando la estadística “fuzzy inference system” (FIS) que se calculó mediante el software *Map comparison Kit*.

Tabla 4. Factores explicativos. Modelos de probabilidad, simulación y validación

Factores	*Descripción y fuente*
Elevación	Reescalado del modelo digital de elevaciones (MDE) a 25 m del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)
Pendiente	Derivado del MDE 25 m PNOA
Orientación	Derivado del MDE 25 mPNOA
Precipitación	Precipitación media de las estaciones climáticas 1940-2005 (MAPA)
Radiación solar	Derivado del producto de irradiación del Global solar atlas
Geología	Mapa geológico 1:100.000
Distancia a las zonas inundables	Distancia euclidiana a zonas inundables con periodo de retorno de 500 años (MITECO)
Áreas protegidas	Figuras de protección locales a Europeas
Densidad de población	Global Human Settlement Population Layer a 250 m
Densidad de viviendas	Densidad de viviendas por municipio según el censo de 2011
Nº de empresas	Número de empresas por municipio entre 2012 y 2018 (INE y Tesorería General de la Seguridad Social)
Nº de personas empleadas	Número de empleados entre 2012 y 2018 (INE y Tesorería General de la Seguridad Social)
Tiempo requerido para ir al trabajo	Tiempo requerido para ir al trabajo según el censo de 2011
Distancia a carreteras principales	Distancia (m) a la autovía o carretera de doble carril
Distancia a calles urbanas	Distancia (m) a vía urbana para vehículos más próxima
Distancia a zonas verdes	Distancia (m) a la zona verde más próxima
Distancia a paradas de transporte público	Distance (m) a la parade de bus o tren más próxima (datos de transporte y OSM)
Distancia a líneas de bus	Distancia (m) a la línea de bus más próxima (datos de transporte y OSM)
Distancia a líneas de trenes	Distancia (m) a la línea de tren más próxima (datos de transporte y OSM)
Distancia a zonas con proyecto de urbanización	Distancia (m) al área con proyecto de urbanización (SIU)
Distancia a zonas sin proyecto de urbanización	Distancia (m) al área sin proyecto de urbanización (SIU)
Distancia al centro	Distancia (m) al centro de la ciudad de Zaragoza
Distancia a asentamiento	Distancia (m) al asentamiento urbano más próximo

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Precisión de los modelos de probabilidad y validación de la simulación

El número de factores seleccionado para estimar la probabilidad de localización de los usos del suelo utilizando los modelos de regresión logística multivariante varía de 1 a 4 (Tabla 5), siendo la densidad de población, la distancia a carreteras, la distancia al centro y la elevación los factores más seleccionados. Los modelos mostraron un buen ajuste para todos los usos del suelo con un valor medio de 0,85 AUC. Los modelos asociados a los distintos tipos de uso urbano mostraron una precisión elevada, con una media de 0,93 AUC, así como las zonas verdes (0,95 AUC) o los reservorios de agua (0,91). Por su parte, valores menores de AUC se obtuvieron para los aeropuertos, áreas en construcción, carreteras, cultivos o zonas naturales con un valor medio de 0,75 mostrando un buen ajuste de los modelos.

Tabla 5. Variables incluidas y precisión de los modelos de probabilidad de usos del suelo según el área bajo la curva (AUC). D. es la abreviatura de distancias.

Uso del suelo	*Variables independientes*	*AUC*
Urbano continuo	D. a carreteras principales (-),Población (+)	0,97
Urbano denso	Elevación (-),D. a carreteras principales (-),Población (+)	0,95
Urbano con densidad media	D. a calles urbanas (-), Población (+)	0,90
Urbano de baja densidad	D. al centro (-),Radiación solar (-), D. a zonas verdes (-),Población (+)	0,90
Urbano disperso	Elevación (-),D. al centro (-),D. a carreteras principales (-)	0,93
Industrial	Elevación (-),D. a carreteras principales (-),Población (+)	0,91
Aeropuerto	Elevación (-)	0,78
Áreas en construcción	D. a zonas verdes (-)	0,76
Zonas verdes	D. a carreteras principales (-),Población (+)	0,95
Cultivos	Pendiente (-),Radiación solar (+), Población (-)	0,73
Pastos	Pendiente (-), Población (-)	0,73
Bosques	Elevación (+), D. a calles urbanas (+), D. a asentamientos (-), D. a las zonas inundables (-)	0,73
Pastizales naturales	Pendiente (+), D. a carreteras principales (+), Población (-)	0,80
Reservorios de agua	Elevación (-), D. a zona con proyecto de urbanización (-), Radiación solar (-), Precipitación (+)	0,91
Carreteras	Pendiente (-), D. al centro (+), D. a asentamientos (-), Población (+)	0,73

La validación independiente de la simulación mostró una buena precisión a escala de pixel, localizando correctamente el 98,8% de los mismos, si bien se obtuvo un bajo acuerdo a escala de pixel entre los cambios observados y simulados (aciertos: 0,1% falsas alarmas: 0,5%, errores: 0,2%, rechazos correctos:98,7%). Estos resultados se han observado de forma recurrente en trabajos previos (Pontius et al., 2008) y es posiblemente debido a que los cambios netos entre el periodo de inicio de la simulación (2012) y el de referencia (2018) no es muy largo. En nuestro caso este periodo es de 6 años debido a que no es posible utilizar los datos del Atlas Europeo de Áreas Urbanas para el año 2006 puesto que no está armonizado, en términos de clases, con respecto a las versiones recientes (Ornetsmüller et al., 2016), si bien estudios recientes muestran que, si hay disponibilidad de datos, utilizar periodos mayores genera una mejora de los estadísticos de precisión, como en el caso de Bacău et al., (2022) que comparó un periodo de 6 años respecto a uno de 12. La precisión a escala de patrones mostró un buen ajuste de las simulaciones con un valor de 0,83 según el estadístico FIS.

3.2. Usos del suelo futuros para los distintos escenarios simulados

El E1, escenario sostenible, muestra un incremento muy reducido del área urbana, fundamentalmente en áreas categorizadas como en construcción y simula un incremento de las zonas cultivadas y bosques a costa de pastos y zonas con escasa vegetación. El E2 muestra un incremento de 16 km^2 del área urbana que se desarrollan sobre áreas que anteriormente eran áreas en construcción, pastizales o zonas naturales con escasa vegetación. Las tendencias de urbanización se enfatizan en el E3 en el que la urbanización se localiza en forma de anillo en torno a la ciudad de Zaragoza, y especialmente en el E4 que muestra, según lo esperado, los cambios más extremos con un incremento de la urbanización de baja densidad, algo que no se percibe en los E1 a E3. Además, el E4 simula nuevos desarrollos aislados de baja densidad en el sector central del valle del Ebro, en torno a áreas con existencia actual de edificaciones de carácter irregular (Figura 1). El crecimiento urbano en Zaragoza se desarrollará, según las simulaciones, en los márgenes de Zaragoza ciudad y se prevé un desarrollo de nuevas áreas urbanas a lo largo de los ejes de desarrollo tradicionales asociados con los ríos Ebro (oeste-este), Gállego (norte-sur) y Huerva (sur-norte). Zaragoza va a continuar acogiendo los crecimientos más notables, si bien municipios próximos como Cuarte, Cadrete, San Juan de Mozarrifar o Villanueva de Gállego muestran un desarrollo notable. Los resultados muestran como el planeamiento urbano es fundamental para crear entornos urbanos compactos, reducir la expansión urbana, mientras que los escenarios con escaso planeamiento generan cambios de usos profundos y patrones poco sostenibles o desordenados.

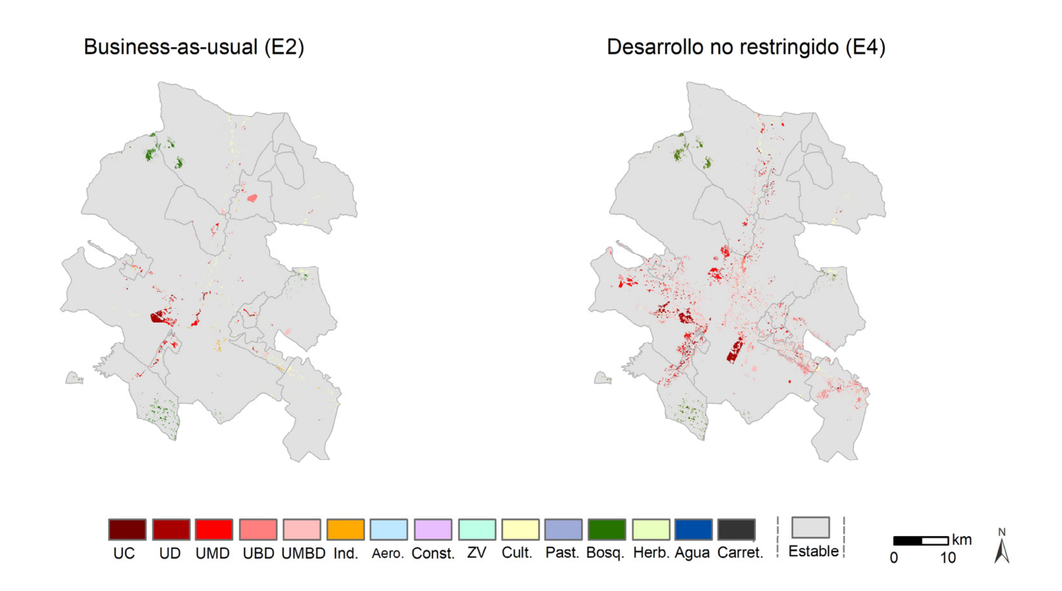


Figura 1. Distribución espacial de los cambios simulados en los usos del suelo para el área urbana de Zaragoza entre 2012 y 2030. Ejemplo para los escenarios E2 y E4. Las abreviaturas de los usos del suelo refieren a las establecidas en la Tabla 1.

4. CONCLUSIONES

El estudio muestra la importancia de integrar el planeamiento urbanístico en las simulaciones de cambios de uso del suelo para proporcionar perspectivas de desarrollo bajo diversos escenarios en el área urbana de Zaragoza. Además, la inclusión del planeamiento urbano considerando la heterogeneidad interna de la zonificación mediante tres densidades de urbanización genera unos patrones simulados más reales. La simulación a 2030 muestra que los principales cambios ocurren en los márgenes de la ciudad de Zaragoza y que en el escenario con cuasi nula planificación se genera un incremento notable de la urbanización de baja densidad con patrones desordenados que suponen un incremento en el área edificada de 36 km^2 superior al escenario *bussiness as usual*. Los resultados pueden ayudar a los gestores y planificadores para identificar áreas vulnerables, la revisión de planes actuales o la generación de nuevos planes que garanticen un desarrollo sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por Swiss National Science Foundation (Consolidator Grant number BSCGIO 157789) y financiación de la Unión Europea-NextGenerationEU a través de una ayuda Margarita Salas a Darío Domingo (MS-240621).

5. BIBLIOGRAFÍA

Bacău, S., Domingo, D., Palka, G., Pellissier, L., y Kienast, F. (2022). Integrating strategic planning intentions into land-change simulations: Designing and assessing scenarios for Bucharest. *Sustainable Cities and Society*, *76*, 103446. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103446

Díaz-Pacheco, J., y García-Palomares, J. C. (2014). Urban Sprawl in the Mediterranean Urban Regions in Europe and the Crisis Effect on the Urban Land Development: Madrid as Study Case. *Urban Studies Research*, *2014*, 1–13. https://doi.org/10.1155/2014/807381

Domingo, D., Palka, G., y Hersperger, A. M. (2021). Effect of zoning plans on urban land-use change: A multi-scenario simulation for supporting sustainable urban growth. *Sustainable Cities and Society*, *69*, 102833. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102833

Dungan, J. L., Perry, J. N., Dale, M. R. T., Legendre, P., Citron-Pousty, S., Fortin, M. J., Jakomulska, A., Miriti, M., y Rosenberg, M. S. (2002). A balanced view of scale in spatial statistical analysis. *Ecography*, *25*(5), 626–640. https://doi.org/10.1034/j.1600-0587.2002.250510.x

Hersperger, A. M., Oliveira, E., Pagliarin, S., Palka, G., Verburg, P., Bolliger, J., y Grădinaru, S. (2018). Urban

land-use change: The role of strategic spatial planning. *Global Environmental Change*, *51*, 32–42. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.05.001

Karakus, C. B., Cerit, O., y Kavak, K. S. (2015). Determination of Land Use/Cover Changes and Land Use Potentials of Sivas City and its Surroundings Using Geographical Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS). *Procedia Earth and Planetary Science*, *15*, 454–461. https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.040

Liang, X., Liu, X., Li, X., Chen, Y., Tian, H., y Yao, Y. (2018). Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method. *Landscape and Urban Planning*, *177*, 47–63. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.04.016

Lin, J., y Li, X. (2019). Large-scale ecological red line planning in urban agglomerations using a semi-automatic intelligent zoning method. *Sustainable Cities and Society*, *46*, 101410. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.12.038

Marroquin, V. M. G., Morollon, F. R., y Rivero, J. P. (2013). Usign GIS technologies for evaluatign urban sprawl in Asturias and Spain. *2013 International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE)*, 1–8. https://doi.org/10.1109/SmartMILE.2013.6708178

Onsted, J. A., y Chowdhury, R. R. (2014). Does zoning matter? A comparative analysis of landscape change in Redland, Florida using cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, *121*, 1–18. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.09.007

Ornetsmüller, C., Verburg, P. H., y Heinimann, A. (2016). Scenarios of land system change in the Lao PDR: Transitions in response to alternative demands on goods and services provided by the land. *Applied Geography*, *75*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.010

Pontius, R. Gil, y Schneider, L. C. (2001). Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *85*(1–3), 239–248. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00187-6

Pontius, Robert Gilmore, Boersma, W., Castella, J. C., Clarke, K., Nijs, T., Dietzel, C., Duan, Z., Fotsing, E., Goldstein, N., Kok, K., Koomen, E., Lippitt, C. D., McConnell, W., Mohd Sood, A., Pijanowski, B., Pithadia, S., Sweeney, S., Trung, T. N., Veldkamp, A. T., y Verburg, P. H. (2008). Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *Annals of Regional Science*, *42*(1), 11–37. https://doi.org/10.1007/s00168-007-0138-2

Pontius, Robert Gilmore, Castella, J.-C., de Nijs, T., Duan, Z., Fotsing, E., Goldstein, N., Kok, K., Koomen, E., Lippitt, C. D., McConnell, W., Mohd Sood, A., Pijanowski, B., Verburg, P., y Veldkamp, A. T. (2018). *Lessons and Challenges in Land Change Modeling Derived from Synthesis of Cross-Case Comparisons* (pp. 143–164). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52522-8_8

Power, C., Simms, A., y White, R. (2001). Hierarchical fuzzy pattern matching for the regional comparison of land use maps. *International Journal of Geographical Information Science*, *15*(1), 77–100. https://doi.org/10.1080/136588100750058715

Price, B., Kienast, F., Seidl, I., Ginzler, C., Verburg, P. H., y Bolliger, J. (2015). Future landscapes of Switzerland: Risk areas for urbanisation and land abandonment. *Applied Geography*, *57*, 32–41. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.12.009

Van Asselen, S., y Verburg, P. H. (2013). Land cover change or land-use intensification: Simulating land system change with a global-scale land change model. *Global Change Biology*, *19*(12), 3648–3667. https://doi.org/10.1111/gcb.12331

van Vliet, J., Verburg, P. H., Grădinaru, S. R., y Hersperger, A. M. (2019). Beyond the urban-rural dichotomy: Towards a more nuanced analysis of changes in built-up land. *Computers, Environment and Urban Systems*, *74*, 41–49. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.12.002

Varela-Candamio, L., Rubiera Morollón, F., y Sedrakyan, G. (2019). Urban sprawl and local fiscal burden: analysing the Spanish case. *Empirica*, *46*(1), 177–203. https://doi.org/10.1007/s10663-018-9421-y

Verburg, P. H., Eickhout, B., y Meijl, H. (2008). A multi-scale, multi-model approach for analyzing the future dynamics of European land use. *Annals of Regional Science*, *42*(1), 57–77. https://doi.org/10.1007/s00168-007-0136-4

Xu, Q., Yang, R., Dong, Y. X., Liu, Y. X., y Qiu, L. R. (2016). The influence of rapid urbanization and land use changes on terrestrial carbon sources/sinks in Guangzhou, China. *Ecological Indicators*, *70*, 304–316. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.05.052

Zhou, L., Dang, X., Sun, Q., y Wang, S. (2020). Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model. *Sustainable Cities and Society*, *55*, 102045. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102045

Zhou, Y., Yi, Y., Jia, W., Cai, Y., Yang, W., y Li, Z. (2020). Applying dendrochronology and remote sensing to explore climate-drive in montane forests over space and time. *Quaternary Science Reviews*, *237*, 106292. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106292



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 40-49

Metodología y herramientas para la generación de un mapa de coberturas del suelo a partir de la combinación de imágenes satelitales (Sentinel 2, PlanetScope, Landsat 8 y Sentinel 1)

O. Eraso Terán[1], *A. Badia Perpinyà*[2], *M. Gisbert*[2]

[1] *Estudiante doctorado en geografía, Universitat Autònoma de Barcelona.*
[2] *Departamento de Geografía, Universitat Autònoma de Barcelona.*

oscarhernando.eraso@autonoma.cat, anna.badia@uab.cat, meritxell.gisbert@uab.cat

RESUMEN: Con el objetivo de analizar el proceso de deforestación y de identificación de las causas y agentes de esta acción/efecto en el municipio de Puerto Guzmán, departamento de Putumayo - Colombia, durante el periodo de 2010-2020, se ha diseñado y aplicado una metodología para la generación de un mapa de coberturas a escala 1:25.000 para el año 2020. Para ello se combinaron las diferentes bandas de los productos satelitales Sentinel 2, Landsat 8, PlanetScope y Sentinel 1, además, se incluyó índices espectrales como variables clasificadoras. El resultado es un conjunto de 70 variables clasificadoras para el año 2020 a la que se le hace una clasificación supervisada utilizando el algoritmo Random Forest. Esta propuesta permite utilizar la información que brindan estos satélites de forma conjunta y, de esta manera, obtener un insumo de alta calidad para resultados más fiables. Esta propuesta metodológica utilizada ha determinado que la combinación de variables clasificadoras disminuye los ruidos (efectos de sal y pimienta), permite una mejor delimitación de las coberturas, mejora la discriminación de las coberturas con índices espectrales similares y se obtiene una mejor precisión.

Palabras-clave: coberturas del suelo, combinación de bandas, clasificación supervisada, índices espectrales.

1. INTRODUCCIÓN

El acelerado proceso de deforestación en la Amazonía se ha vuelto cada vez más objeto de escrutinio público. La presión a los gobiernos que la albergan, para que tomen cartas en el asunto, ha incentivado la implementación de diversas estrategias encaminadas a contrarrestar este fenómeno. En Colombia, el gobierno nacional estableció como marco de acción la Estrategia Integral de Control a la Deforestación y Gestión de los Bosques -EICDGB (MINAMBIENTE-IDEAM, 2018), siendo el eje articulador la mejora de la gobernanza forestal. Para lograr esta mejora, es necesario refinar la escala espacial y temporal del monitoreo y de la caracterización de la dinámica socioeconómica asociada a la disminución de cobertura de bosque.

Un primer paso en los procesos de caracterización de las dinámicas mencionadas es identificar donde se están llevando a cabo, y, en segundo lugar, conocer cuáles son las motivaciones de que se realicen. Para saber dónde, el mejor insumo es un mapa de cobertura, que permite, además, definir el cambio de la extensión de determinada cubierta vegetal (Badia, Anna; Gisbert, Meritxell, 2021). Una vez identificada la disminución de la cobertura forestal, se pasa a determinar las motivaciones que llevan a las personas a realizar su transformación (IDEAM, 2018).

En la presente comunicación se propone una metodología para elaborar mapas de coberturas de detalle para el año 2020 a escala 1:25.000 con el fin de facilitar las labores de monitoreo de las áreas con cobertura boscosa. La dificultad de acceso en algunos parajes debido al orden público y las grandes superficies de cambio de cobertura hace que la teledetección sea una herramienta viable para levantar información primaria de caracterización de las coberturas en el área de estudio.

Poder detectar el tipo de cobertura es posible mediante la teledetección, que al usar sensores remotos implica medir la radiación electromagnética de características de la superficie de la Tierra, que, a su vez pueden agruparse en diferentes clases de cobertura del suelo (por ejemplo, pasto, hormigón, agua, etc.), debido a que reflejan la radiación de diferentes maneras, proporcionando una representación básica de la variación

de la cobertura terrestre (Aplin, 2004). Así pues, la recolección de conjuntos de datos mediante teledetección permite el mapeo sistemático de las coberturas del suelo. El correcto estudio de Land Use and Land Cover Change (LULCC), permite comprender los cambios en el territorio, anticipar procesos futuros y planificar futuros comportamientos (González-Guerrero & Pons, 2020).

Los métodos de clasificación convencionales pueden verse desafiados por el error de clasificación entre cubiertas espectralmente similares. Además, en áreas con nubosidad matutina frecuente, la recolección incluso de unas pocas escenas sin nubes durante un año puede resultar difícil (Serra, Pons, y Saurí. 2003). Afortunadamente, la masificación de los productos satelitales dio lugar a la aparición de métodos para generar productos de cobertura terrestre anual a partir de series de tiempo (Franklin, y otros, 2015) citado en (Nguyen, Joshi, Clay, & Henebry, 2020), facilitando el subsanar estas faltas de información. Esto es especialmente útil al determinar los cambios de LULCC, porque permite llevar el análisis a resoluciones espaciales más detalladas, debido a que la escala depende del tamaño del píxel (Serra, Pons, y Saurí, 2003).

2. ÁREA DE ESTUDIO

Puerto Guzmán es un municipio del departamento del Putumayo ubicado a orillas del río Caquetá, a dos horas por tierra de Mocoa y quince de Bogotá (Uribe, 2020). Limita por el norte y por el oriente con los departamentos de Cauca y Caquetá, por el occidente con los municipios de Mocoa y Puerto Caicedo y al sur con el municipio de Puerto Asís y Leguizamo. (Figura 1)

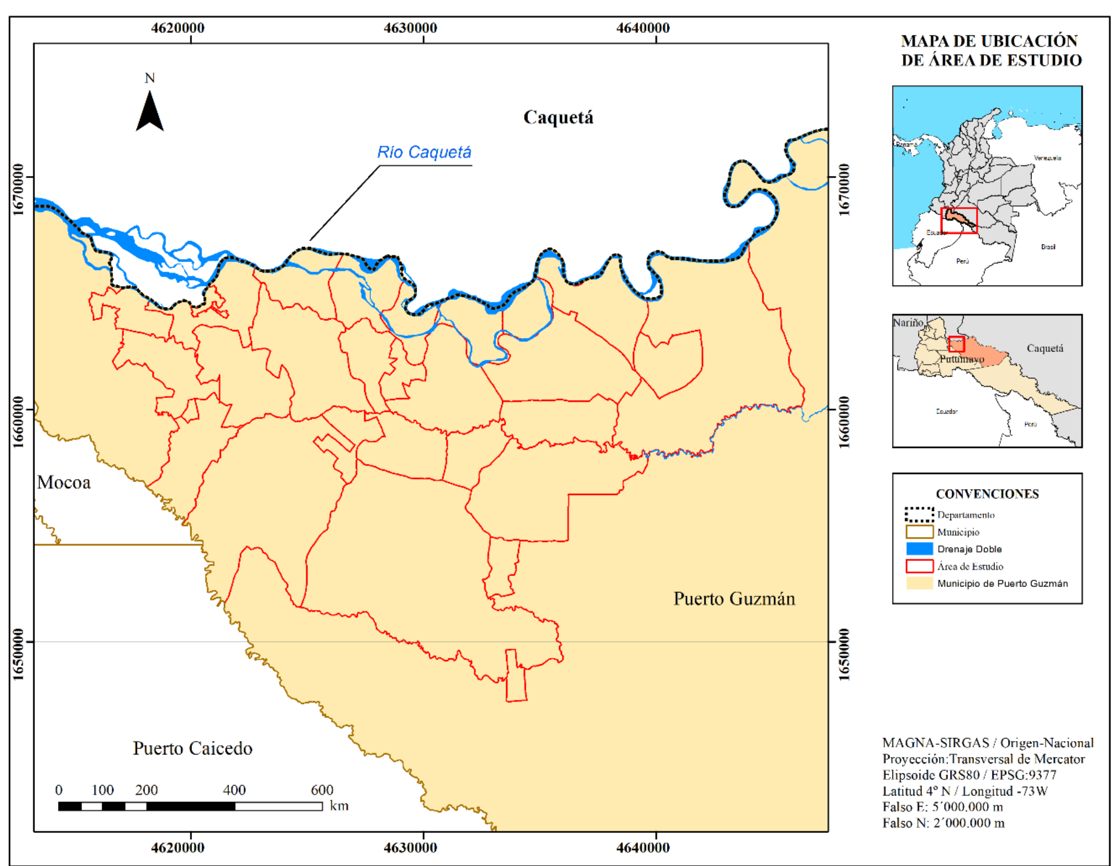


Figura 1. Área de Estudio.

Puerto Guzmán es uno de los municipios con una alta dinámica de transformación de las coberturas naturales (IDEAM, 2018). Se localiza en un núcleo denominado “arco deforestación Amazonía”, en donde, del 2005 al 2010, se concentró el 58,4% de la deforestación de Colombia. La ventana temporal seleccionada es comparar el 2010 y el 2020, este lapso obedece a lo estipulado en la Ley 1844 del 14 de Julio de 2017, en la que el estado colombiano se compromete a cumplir lo aprobado en el “Acuerdo de París” en el 2015. Dicho acuerdo indica que la base de referencia de superficie de bosque y de cambio en la superficie de bosque para desarrollar medidas de reducción de deforestación y de mitigación al cambio climático, deben ser tomadas a partir del año 2010.

El área de estudio corresponde a la cabecera municipal y sus veredas aledañas del municipio de Puerto Guzmán, con un total de 50.00 hectáreas.

3. DATOS

Se descargaron las imágenes de los satélites (Sentinel 2, Landsat 8, PlanetScope y Sentinel 1) para el periodo comprendido entre abril y agosto del año 2020, para el área de estudio, el nivel de preprocesamiento de los sensores pasivos es Surface Reflectance (SR).

A través de Google Earth Engine (*GEE)* se realizó la descarga de imágenes del satélite Sentinel 2 (2 imágenes) y Landsat 8 (1 imagen) para seleccionar las imágenes se tuvo en cuenta la variable creada a partir del *shapefile* del área de estudio y las fechas de interés. Para las imágenes de PlanetScope se usó el plugin *Planet_Explorer* del software QGIS, usando la licencia anual de estudiante e investigación, se descargaron 6 imágenes PlanetScope. Se han obtenido varias imágenes por lo que ha sido necesario hacer un mosaico de todas ellas para poderlas procesar y tratar en conjunto. También se usó las imágenes de Sentinel 1 con polarización VV y VH de agosto de 2020.

Para superponer las imágenes de los diferentes satélites se procuró tener el mismo tamaño de píxel y mismo origen de cuadricula, debido a la diferente resolución espacial de dichas imágenes (PlanetScope 3m, Sentinel2 – 10m y 20m y Landsat8 – 30m), estas fueron remuestreadas por interpolación bilineal a la resolución más detallada (3m).

Se definieron como variables de clasificación las bandas espectrales de los sensores pasivos y los datos polarizados VV y VH de Sentinel 1 (Tabla 1), esto hace un total de 22 variables de clasificación.

Tabla 1. Variables de Clasificación parte 1.

	CANTIDAD DE VARIABLES DE CLASIFICACIÓN
BANDAS ESPECTRALES LANDSAT 8 *B2L_AZUL* *B3L_VERDE* *B4L_ROJO* *B5L_INFRARROJO_CERCANO_NIR* *B6L_INFRARROJO_ONDA_CORTA_SWIR_1* *B7L_INFRARROJO_ONDA_CORTA_SWIR_2*	6
BANDAS ESPECTRALES SENTINEL 2 *B2S_AZUL* *B3S_VERDE* *B4S_ROJO* *B5S_BORDE_ROJO_1* *B6S_BORDE_ROJO_2* *B7S_BORDE_ROJO_3* *B8S_INFRARROJO_CERCANO_NIR_1* *B8AS_INFRARROJO_CERCANO_NIR_2* *B11S_INFRARROJO_ONDA_CORTA_SWIR_1* *B12S_INFRARROJO_ONDA_CORTA_SWIR_2*	10
BANDAS ESPECTRALES PLANETSCOPE *B1P_AZUL* *B2P_VERDE* *B3P_ROJO* *B4P_INFRARROJO_CERCANO_NIR*	4
SENTINEL 1 *Polarización VV* *Polarización VH*	2
TOTAL VARIABLES DE CLASIFICACIÓN	22

Tabla 2. Variables de Clasificación parte 2.

ÍNDICES ESPECTRALES	CANTIDAD DE VARIABLES DE CLASIFICACIÓN	ÍNDICES ESPECTRALES	CANTIDAD DE VARIABLES DE CLASIFICACIÓN
1. NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI) NDVI (Landsat 8) NDVI (Sentinel 2) NDVI (PlanetScope)	3	10. BARE SOIL INDEX (BSI) BSI (Landsta 8) BSI (Sentinel 2)	2
2. GREEN NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (GNDVI) GNDVI (Landsat 8) GNDVI (Sentinel 2) GNDVI (PlanetScope)	3	11. NORMALIZED DIFFERENCE WATER INDEX (NDWI) NDWI (Landsat 8) NDWI (Sentinel 2) NDWI (PlanetScope)	3
3. ENHANCED VEGETATION INDEX (EVI) EVI (Landsat 8) EVI (Sentinel 2) EVI (PlanetScope)	3	12. NORMALIZED DIFFERENCE SNOW INDEX (NDSI) NDSI (Landsat 8) NDSI (Sentinel 2)	2
4. ADVANCED VEGETATION INDEX (AVI) AVI (Landsat 8) AVI (Sentinel 2) AVI (PlanetScope)	3	13. NORMALIZED DIFFERENCE GLACIER INDEX (NDGI) NDGI (Landsat 8) NDGI (Sentinel 2) NDGI (PlanetScope)	3
5. SOIL ADJUSTED VEGETATION INDEX (SAVI) SAVI (Landsat 8) SAVI (Sentinel 2) SAVI (PlanetScope)	3	14. ATMOSPHERICALLY RESISTANT VEGETATION INDEX (ARVI) ARVI (Lansat 8) ARVI (Sentinel 2) ARVI (PlanetScope)	3
6. NORMALIZED DIFFERENCE MOISTURE INDEX (NDMI) NDMI (Landsat 8) NDMI (Sentinel 2)	2	15. STRUCTURE INSENSITIVE PIGMENT INDEX (SIPI) SIPI (Lansat 8) SIPI (Sentinel 2) SIPI (PlanetScope)	3
7. MOISTURE STRESS INDEX (MSI) MSI (Landsat 8) MSI (Sentinel 2)	2	16. GREEN LEAF INDEX (GLI) GLI (Lansat 8) GLI (Sentinel 2) GLI (PlanetScope)	3
8. GREEN CHLOROPHYLL INDEX (GCI) GCI (Landsat 8) GCI (Sentinel 2) GCI (PlanetScope)	3	17. RED GREEN RATIO (RGR) RGR (Lansat 8) RGR (Sentinel 2) RGR (PlanetScope)	3
9. NORMALIZED BURNED RATIO INDEX (NBRI) NBRI (Landsat 8) NBRI (Sentinel 2)	2	18. NORMALIZED DIFFERENCE BUILT-UP INDEX (NDBI) NDBI (Landsat 8) NDBI (Sentinel 2)	2
TOTAL VARIABLES DE CLASIFICACIÓN			48

También se utilizaron como variables de clasificación 18 índices espectrales derivados de las imágenes de los sensores pasivos (Tabla 2) obteniendo 48 variables de clasificación adicionales, que sumadas a las 22 variables anteriores nos da un total de 70 variables de clasificación.

Es en base a este producto (70 variables de clasificación) que fue cargado a la plataforma de GEE, que se realizó una clasificación supervisada, utilizando el algoritmo Random Forest, con el fin de generar un mapa de coberturas a escala 1:25.000 para el año 2020.

4. METODOLOGÍA

4.1. Identificación de las clases a partir de un sistema de clasificación supervisado de cobertura de la tierra.

La generación de índices espectrales tales como los índices de diferencia normalizada de vegetación, agua y humedad, facilita la interpretación de territorios agropecuarios, forestales, centros poblados y cuerpos de agua. Se realiza la clasificación supervisada en *GEE* utilizando el algoritmo *Random Forest*.

Se utilizaron 210 píxeles de entrenamiento y 70 píxeles de validación (Figura 2) para identificar 7 coberturas del suelo (Tabla 3).

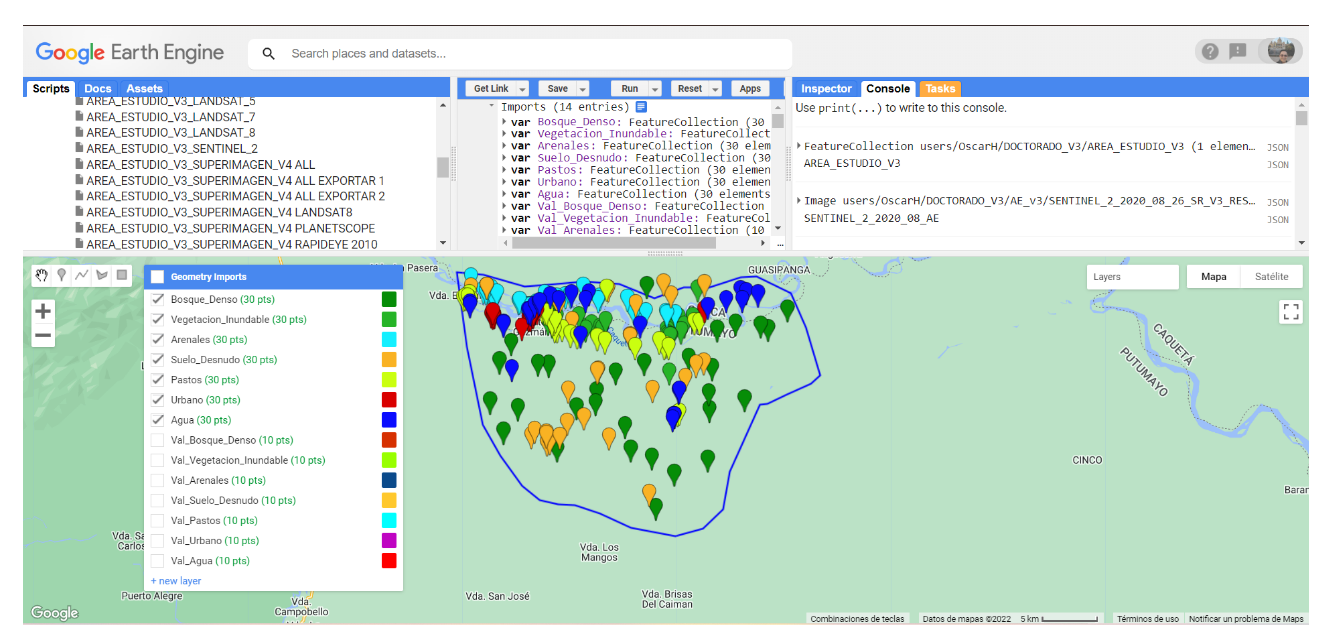


Figura 2. Píxeles de entrenamiento y validación.

Tabla 3. Listado de coberturas identificadas a través de la clasificación supervisada.

Id	*COBERTURAS*
1	Bosque denso de Tierra firme
2	Bosque denso inundable
3	Pastos
4	Agua
5	Tejido urbano
6	Tierras desnudas y degradadas
7	Zonas arenosas naturales

Una vez entrenado el modelo, se corrió para toda el área de estudio utilizando el algoritmo *Random Forest* (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**3).

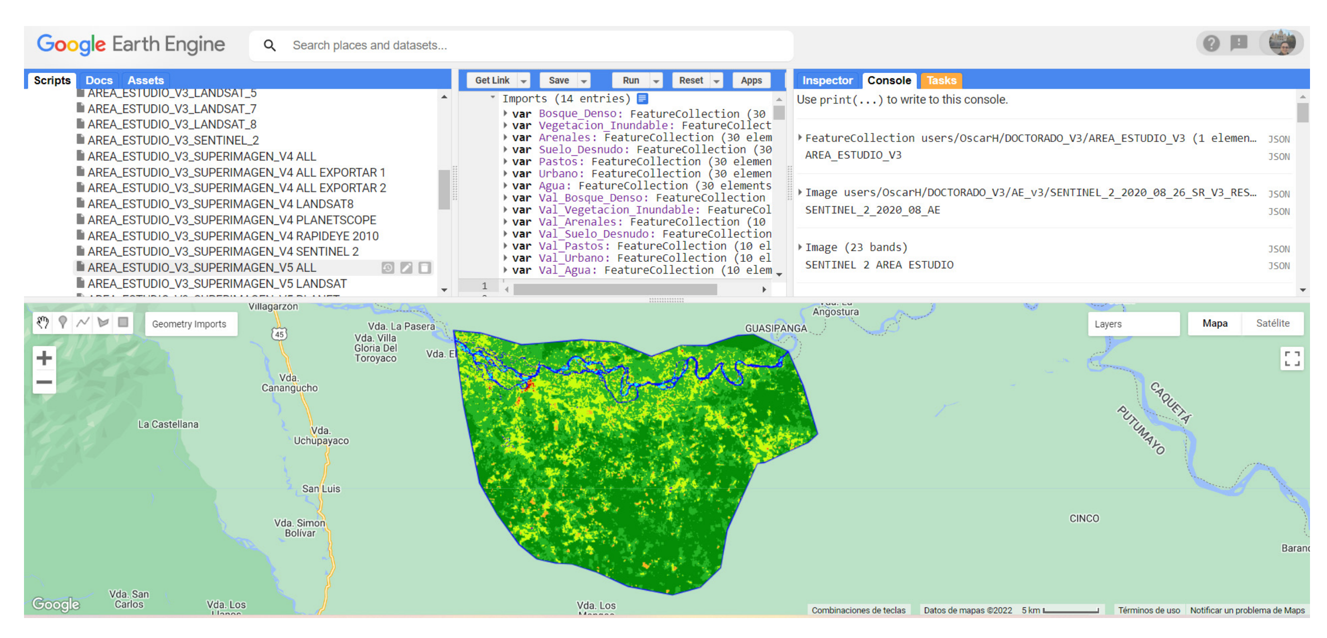


Figura 3. Resultado de la clasificación supervisada usando el algoritmo Random Forest.

4.2. Ajuste y mejora de las coberturas identificadas

Las 7 coberturas generadas a través de la clasificación supervisada fueron ajustadas y mejoradas a partir de fotointerpretación usando geoprocesos de *merge y cortar,* para ajustar los polígonos. Uno de los principales ajustes fue la reclasificación de la cobertura de agua en 4 categorías (a. Ríos, b. Lagunas, lagos y ciénegas naturales, c. Estanques para acuicultura continental y d. Zonas pantanosas). Para el ajuste y mejora de las coberturas se realizó la visualización de las imágenes a través de diferentes combinaciones de bandas. De las imágenes en color verdadero, se obtiene como resultado coberturas de color café (ríos, quebradas y algunos suelos intervenidos), verde oscuro (zonas boscosas, de transición o de vegetación secundaria), verde claro (cultivos y/o pastos) y grises o blancos (tejido urbano). Como resultado se identificaron 11 coberturas (Tabla 4).

Tabla 4. Listado final de coberturas identificadas.

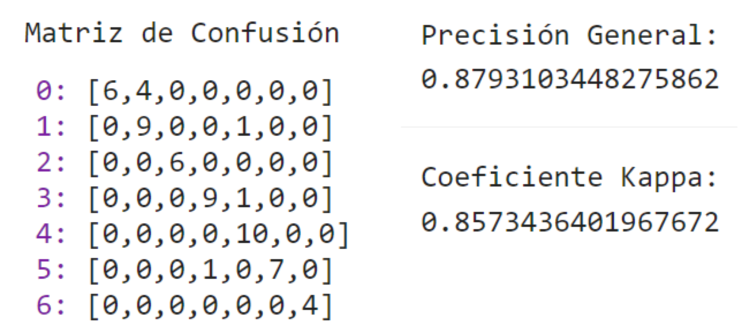
Id	*COBERTURAS*
1	Bosque denso de tierra firme
2	Bosque denso inundable
3	Estanques para acuicultura continental
4	Lagunas, lagos y ciénagas naturales
5	Pastos
6	Ríos
7	Tejido urbano
8	Tierras desnudas y degradadas
9	Vegetación secundaria o en transición
10	Zonas arenosas naturales
11	Zonas pantanosas

Para diferenciar los bosques de la vegetación secundaria y otras coberturas se usó combinaciones de Pseudocolor, con la banda del infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo de onda corta (SWIR) e infrarrojo térmico (TIRS), para clasificar las coberturas con base a la humedad y temperatura. Así, los bosques tienen tonalidades oscuras y texturas porosas, mientras que, las zonas de transición tienen granos más suaves.

5. RESULTADOS:

5.1. Validación de la clasificación supervisada

Para validar la clasificación supervisada se generó una matriz de confusión a partir de los píxeles de validación, dando como resultado una precisión general de 0.8793 y un coeficiente de Kappa de 0.8573 (Figura 4).



```
Matriz de Confusión

0: [6,4,0,0,0,0,0]
1: [0,9,0,0,1,0,0]
2: [0,0,6,0,0,0,0]
3: [0,0,0,9,1,0,0]
4: [0,0,0,0,10,0,0]
5: [0,0,0,1,0,7,0]
6: [0,0,0,0,0,0,4]

Precisión General:
0.8793103448275862

Coeficiente Kappa:
0.8573436401967672
```

Figura 4. Matriz de Confusión, precisión general y coeficiente Kappa.

5.2. Comparación de resultados de la clasificación supervisada.

A continuación, se muestra el detalle de las imágenes resultantes de la clasificación supervisada para el año 2020 (Figura 5), una primera clasificación utilizando las 70 variables de clasificación, la segunda a partir de las variables de clasificación derivadas de PlanetScope, la tercera a partir de las variables de clasificación derivadas de de Sentinel 2 y la cuarta a partir de la polarización VV de Sentinel 1. Posteriormente se comparan dos imágenes de Sentinel 2 (Figura 6), la primera utiliza como variables de clasificación las bandas espectrales y la segunda integra también índices espectrales como variables de clasificación. Por último, se comparan entre si las imágenes obtenidas, y se señalan detalles que se logran mejorar con el método propuesto.

5.2.1. Detalle de las imágenes resultantes de la clasificación supervisada con 70 variables clasificadoras vs las variables clasificadoras derivadas de cada sensor de forma individual.

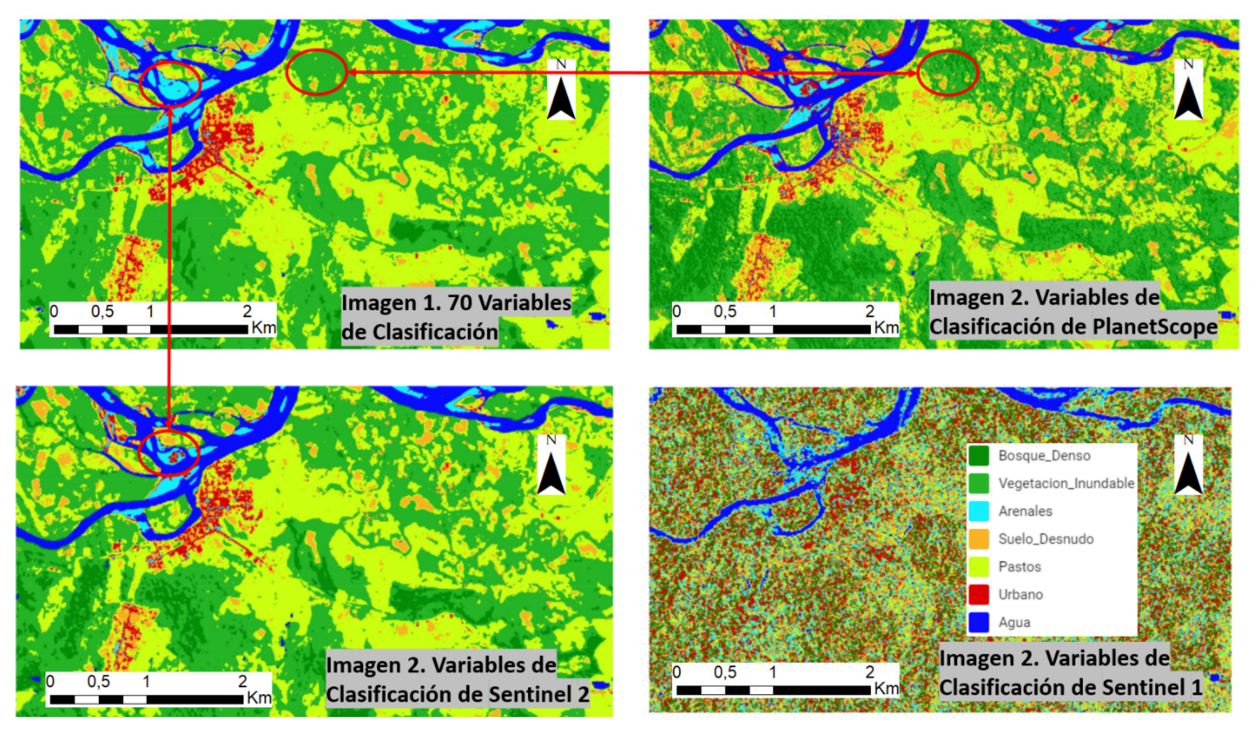


Figura 5. Resultados de las clasificaciones supervisadas para el año 2020.

5.2.2. Clasificación supervisada de Sentinel 2 con 10 bandas espectrales vs clasificación supervisada de Sentinel 2 con bandas e índices espectrales

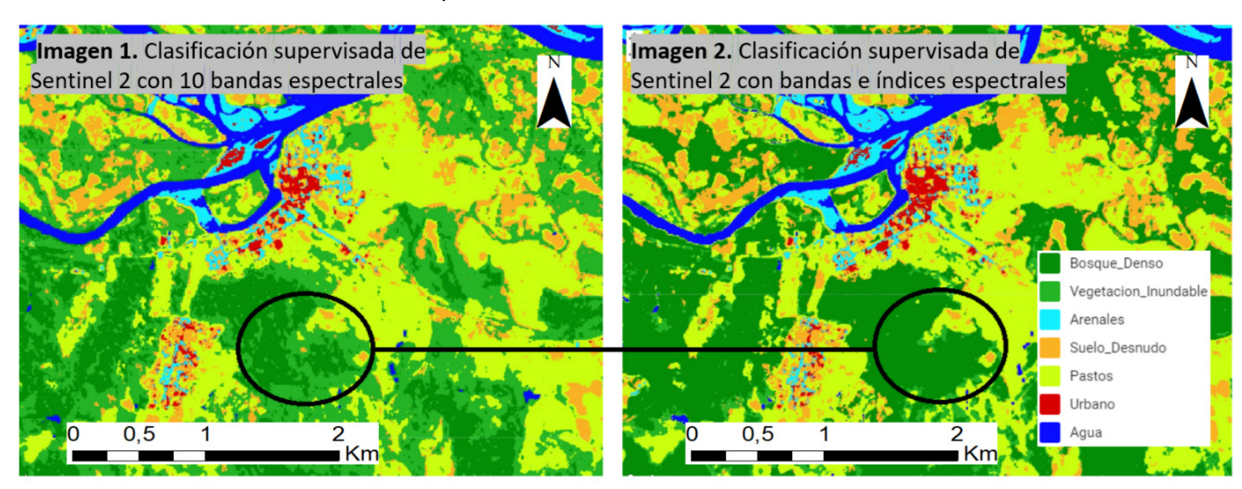


Figura 6. Clasificación supervisada de Sentinel 2 con 10 bandas espectrales vs clasificación supervisada de Sentinel 2 con bandas e índices espectrales.

Al añadir como variables de clasificación los índices espectrales se obtiene mejores resultados de identificación de coberturas (Figura 6), logrando delimitar y diferenciar mejor la cobertura de bosque de tierra firme con la de vegetación inundable.

Para todos los resultados se utilizó el algoritmo Random Forest y los mismos píxeles de entrenamiento. A continuación, se listan las diferencias del resultado de la clasificación supervisada con 70 variables de clasificación respecto a la clasificacion supervisada con las variables derivadas de PlanetScope **(Imagen 1 de la Figura 5 vs Imagen 2 de la Figura 5)**

- Se puede observar que el resultado de la clasificacion supervisada al usar unicamente las bandas espectrales de PlanetScope arroja un efecto sal y pimienta (es un tipo de ruido que hace que aparezca una serie de píxeles aislados de aspecto muy contrastado con sus vecinos), mientras que el resultado de la clasificacion supervisada usando las 70 variables de clasificación el efecto sal y pimienta se ve reducido significativamente.

En lo que respecta a las diferencias del resultado de la clasificación supervisada con 70 variables de clasificación respecto a la clasificacion supervisada con las variables derivadas de Sentinel 2 **(Imagen 1 de la Figura 5 vs Imagen 3 de la Figura 5)**

- En la clasificacion supervisada usando solo las bandas de Sentinel 2 el error es más alto en la identificación de coberturas, respecto a la clasificacion supervisada usando las 70 variables de clasificación. Fue especialmente evidente respecto a cobertura urbana, que la identifica en sitios que no aplica, este error se pudo verificar en campo y fotointerpretación.

Por último, respecto a las diferencias del resultado de la clasificación supervisada con 70 variables de clasificación respecto a la clasificacion supervisada con sentinel 1 (**Imagen 1 de la Figura 5 vs Imagen 4 de la Figura 5**): si bien Sentinel 1 es un sensor radar y entre sus ventajas se cuenta que no se ve limitado por la nubosidad, se puede observar que el resultado de la clasificacion supervisada usando este sensor brinda una identificacion aceptable de la cobertura de agua pero no es óptimo al identificar las demas coberturas.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La ventaja de usar índices espectrales como variables de clasificación es que se facilita la discriminación de clases dentro de una misma categoría al permitir estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Este aspecto es relevante para el tema de estudio, en este caso la deforestación, ya que la presencia de vegetación secundaria alta no es igual de significativa que la presencia de cobertura de bosque denso. El uso

de los índices espectrales también facilita la determinación de áreas de humedales, importantes por la existencia de bosques inundables que son objeto de medidas de protección adicional. Por lo tanto, la incorporación de los índices dentro de la determinación de la cobertura mejora el análisis, porque permite ir más allá de saber que hay sobre la superficie del suelo, al facilitar la discriminación de una categoría, refinando el nivel de detalle.

La integración de las bandas de Landsat 8, PlanetScope, Sentinel 1 y 2, con los índices espectrales, mejora la discriminación de coberturas, ya que hay un abanico más grande de información asociada al píxel, facilitando su clasificación. Por ende, los ruidos sal y pimienta se reducen, y la delimitación de coberturas tiene mejores niveles de coherencia. Las coberturas resultantes al usar las 70 variables de clasificación muestran más homogeneidad dentro de cada categoría y un patrón de distribución de cada cubierta del suelo más lógico, es decir, se resuelven detalles como áreas con agua superficial al interior de enclaves urbanos o al contrario, zonas urbanas en sitios no convencionales. La corroboración fue realizada con recorridos de campo.

7. CONCLUSIONES

La dinámica de la deforestación es cada vez más rápida. La desaparición de grandes extensiones de bosque natural en cortos periodos de tiempo exige conocer de forma rápida los puntos en donde se están realizando cambios de cobertura para destinar esfuerzos a corto plazo. El uso de técnicas que identifiquen de forma semiautomatizada las coberturas significa un tiempo más corto de revisión, y por ende, de entrega a tiempo de la cartografía a los encargados del monitoreo, para el control y prevención de la deforestación.

La metodología propuesta permite realizar mapas de coberturas en zonas que son de difícil acceso ya que utiliza como insumo principal los datos que ofrecen los sensores remotos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha realizado en el contexto del proyecto "Calibración de indicadores de influencia humana y climática para la (re)interpretación de la expansión postglacial y de las dinámicas de los bosques en los últimos 18.000 años (PID2019-108282GB-I00)", Agencia Estatal de investigación (AEI), Ministerio de Ciencia e Innovación.

8. BIBLIOGRAFÍA

Aplin, P. (2004). Remote sensing: land cover. *Progress in Physical Geography, 28*(2), 283-293. doi:10.1191/0309133304pp413pr

Badia, A., Pallares-Barbera, M., Valldeperas, N., y Gisbert, M. (2019). Wildfires in the wildland-urban interface in Catalonia: Vulnerability analysis based on land use and land cover change. *Science of the Total Environment, 673*, 184-196. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.012

Badia, Anna; Gisbert, Meritxell. (2021). La continuidad forestal como desafío a los incendios en las comarcas de montaña de Cataluña (1993-2018). *Geografía, Cambio Global y Sostenibilidad. XXVII Congreso de Geografía*, (págs. 523 - 538).

Badia, Anna; Valldeperas, Natàlia. (2015). El valor histórico y estético del paisaje: claves para entender la vulnerabilidad de la interfaz urbano-forestal frente a los incendios. *Scripta Nova*.

De Luque, M., Pérez, J., Rodríguez, Y., y Jiménez-Rodríguez, C. (2019). Análisis del proceso de fragmentación de bosques: metodologías orientadas en el uso de sistemas de información geográfica y métricas del paisaje. *Revista Ciencias Agropecuarias, 5*(1), 32-42. doi:10.36436/24223484.193

Delgado, M. (2019). *Uso potencial y efectivo de la tierra agrícola en colombia: resultados del censo nacional agropecuario.* Bogotá: Fedesarrollo.

Franklin, S., Ahmed, O., Wulder, M., White, J., Hermosilla, T., y Coop, N. (2015). Large Area Mapping of Annual Land Cover Dynamics Using Multitemporal Change Detection and Classification of Landsat Time Series Data. *Canadian Journal of Remote Sensing, 41*(4), 293-314. doi:10.1080/07038992.2015.1089401

González-Guerrero, O., y Pons, X. (2020). The 2017 Land Use/Land Cover Map of Catalonia based on Sentinel-2 images and auxiliary data. *Revista de teledetección, 55*, 81-92. doi:https://doi.org/10.4995/raet.2020.13112

Hassan, Z., Shabbir, R., Saeed, S., Haider, A., Aziz, N., Butt, A., y Erum, S. (2016). Dynamics of land use and land cover change (LULCC) using geospatial techniques: a case study of Islamabad PakistanZahra. *SpringerPlus*(812). doi:10.1186/s40064-016-2414-z

IDEAM. (2018). *Caracterización de las causas y agentes de la transformación del bosque natural en Colombia: avances y perspectivas.* Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM - Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono SMByC.

Lu, D., Mausel, P., Brondízios, E., y Moran, E. (2004). Change Detection Techniques. *International Journal of Remote Sensing, 25*(12), 2365–2407. doi:DOI: 10.1080/0143116031000139863

MINAMBIENTE-IDEAM. (2018). *Estrategia Integral de Control a la Deforestación y Gestión de los Bosques.* Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/images/Estrategia_Integral_de_control_a_la_Deforestacion_y_Gestion_de_los_Bosques.pdf

Nguyen, L., Joshi, D., Clay, D., y Henebry, G. (2020). Characterizing land cover/land use from multiple years of Landsat and MODIS time series: A novel approach using land surface phenology modeling and random forest classifier. *Remote Sensing of Environment, 238*. doi:https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.016

Turner II, B., Lambin, E., y Verburg, P. (2021). From land-use/land-cover to land system science. *Ambio, 50*, 1291-1294. doi:https://doi.org/10.1007/s13280-021-01510-4

Uribe, S. (2020). *Puerto Guzmán*. Obtenido de Credencial: https://www.revistacredencial.com/historia/temas/puerto-guzman

Verburg, P., Neumann, K., y Nol, L. (2011). Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Global Change Biology, 17*, 974-989. doi: doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02307.x



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 50-59

La monitorización de cultivos mediante imágenes de satélite en la Política Agraria Común: proceso de implementación en España

S. Esteban Rodríguez

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza.
C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza.

sestebanr@unizar.es

RESUMEN: El lanzamiento de los satélites Sentinel de Copernicus y la integración de los avances científicos en la normativa de la Unión Europea han permitido la puesta en marcha de los controles mediante monitorización en el marco de la Política Agraria Común. Estos controles, que integran el análisis de series multitemporales, se han implementado en España entre 2019 y 2022. Tomando este proceso como caso de estudio, en este trabajo, se analiza el ciclo de vida de los controles, la difusión territorial de las innovaciones y las ventajas que supone su introducción; para ello, la monitorización se pone en relación con los controles sobre el terreno clásicos y con los controles por teledetección. El ciclo de vida se ha analizado mediante la evolución de las inspecciones llevadas a cabo con cada tipo de control. La difusión se analiza mediante la identificación de medios innovadores y mecanismos de interacción social. Las ventajas de la introducción de la monitorización se analizan desde el punto de vista de los costes por superficie.
Entre los principales resultados, cabe destacar que la monitorización ha reemplazado a otro tipo de controles y que su introducción en España ha partido de múltiples focos. El proceso de difusión territorial en estos se asocia con una introducción gradual. En los adoptantes posteriores, la puesta en marcha de la monitorización se vincula con mecanismos de interacción puestos en marcha, fundamentalmente, por el organismo de coordinación español. La adopción de la monitorización incrementa el área cubierta por los controles y reduce los costes por unidad de superficie, pudiendo suponer un ahorro importante para las arcas públicas y una mejor gestión de los fondos comunitarios.

Palabras-clave: Política Agraria Común (PAC), controles mediante monitorización, difusión de innovaciones.

1. INTRODUCCIÓN

El Reglamento de Ejecución (UE) núm. 2018/746 de la Comisión, de 18 de mayo de 2018, introdujo los controles mediante monitorización de las ayudas de la Política Agraria Común (PAC). Estos se basan en la evaluación de las condiciones de admisibilidad utilizando series multitemporales de imágenes de satélite y procesos automatizados, que se complementan con acciones de seguimiento en las que la interacción con los agricultores juega un papel fundamental.

El objetivo de este trabajo es analizar la puesta en marcha de los controles mediante monitorización desde el punto de vista de la innovación. El caso de estudio analizado es España, país en el que, entre 2019 y 2022, se han implantado estos controles (FEGA, 2020a; FEGA, 2022a). El marco de referencia utilizado han sido las definiciones del Manual de Oslo de 2018 y teorías clásicas acerca de la adopción y difusión de las innovaciones; en concreto: la teoría del ciclo de vida del producto (Levitt, 1965), la teoría de la difusión de las innovaciones (Rogers, 1962) y la teoría del entorno innovador (Aydalot, 1986). Adicionalmente, dado que la adopción de una innovación como la monitorización puede suponer ventajas económicas para los adoptantes (CE y Ecorys, 2018; Ehlers et al., 2021), se analiza desde el punto de vista de los costes.

Las hipótesis que se plantean son las siguientes: 1. La implantación de los controles mediante monitorización, en relación con otros tipos de control, se ajusta al modelo propuesto por la teoría del ciclo de vida del producto; 2. La difusión de la monitorización en España se vincula con la aparición de medios innovadores y la interacción entre actores; 3. La adopción de la monitorización supone una ventaja y ha supuesto un ahorro en el coste de los controles.

En el documento, en primer lugar, se desarrolla el marco teórico y legislativo. En él, se contextualizan y definen los controles mediante monitorización en relación con la PAC y se expone el marco conceptual. En

el apartado de metodología se detallan las fuentes de datos y los procedimientos utilizados para dilucidar las hipótesis planteadas. El apartado de resultados se organiza atendiendo a la formulación de hipótesis efectuada anteriormente. Por último, se ha añadido un apartado en el que se discuten los resultados y se sintetizan las principales conclusiones del trabajo.

2. MARCO TEÓRICO Y LEGISLATIVO

2.1. Los controles mediante monitorización

La política agraria común (PAC) supuso en 2021 el 33,1% del presupuesto de la Unión Europea (UE) (Nègre, 2022). Esa misma campaña, tan solo en España, el número de beneficiarios de la PAC ascendió a 654.653 y el importe de los pagos directos fue superior a 5.450 millones de euros (FEGA, 2022b). La PAC moviliza una gran cantidad de recursos públicos, un total de 55.713 millones de euros en 2021 (Nègre, 2022), y requiere una vigilancia continua. En relación con esto, el artículo 58.2 del Reglamento 1306/2013 señala que los Estados tienen el deber de implantar un Sistema Integrado de Gestión y Control (SIGC). En España, el Fondo Español de Garantía Agraria (FEGA) es quién coordina los sistemas de control (RD. 1075/2014, Art. 99.5). Sin embargo, los responsables de verificar el cumplimiento de las condiciones de admisibilidad son las Comunidades Autónomas (RD. 1075/2014, Art. 99.4). La Comisión Europea puede comprobar la forma de verificar las operaciones financiadas por los fondos en los estados miembros (R. 1306/2013, Art. 47).

La utilidad de las series multitemporales de imágenes de satélite en el análisis de las prácticas agrarias y en la identificación de cultivos es algo puesto de relieve en numerosos trabajos desde la década de 1990 (Quarmby et al., 1993; Murthy et al., 2003; Vyas et al., 2005). En el año 2014, la Agencia Espacial Europea (ESA) puso en órbita los primeros satélites Sentinel, que cuentan con gran resolución espacial y temporal. Esto ha aumentado la posibilidad de construir series temporales de alta resolución y se han multiplicado las publicaciones científicas que las aplican a la identificación de actividades agrarias (Portalés-Julià et al., 2017; Ghazaryan et al., 2018; Recuero et al., 2019).

La normativa europea no ha sido ajena a los avances en la materia. En 2018, a través del RE. 2018/746, permitió a los Estados utilizar en los controles de la PAC "un procedimiento de observación, seguimiento y evaluación regulares y sistemáticos de todos los criterios de admisibilidad, los compromisos y otras obligaciones que puedan ser objeto de monitorización mediante datos de los satélites Sentinel de Copernicus u otros datos con valor al menos equivalente, durante un período de tiempo que permita extraer conclusiones sobre la admisibilidad de la ayuda solicitada" (R. 809/2014, Art. 40 bis.1 a). En relación con ello, se han publicado numerosos trabajos con técnicas de aplicación a estos controles (Paredes-Gómez et al., 2020; López-Andreu et al., 2021) y, por parte del *Joint Research Centre* (JRC), servicio de ciencia y conocimiento de la Comisión Europea, guías metodológicas (Devos et al., 2018a, Luketić et al., 2021).

El RE. 2018/746 establecía un periodo de implementación gradual de la monitorización conocido como *phasing-in*. En este, se permitía a las autoridades adoptar la monitorización en determinados ámbitos y regímenes de ayuda. En los años siguientes, la superficie a monitorizar debía incrementarse de forma paulatina hasta alcanzar la totalidad del territorio. A partir del 1 de enero de 2023 es de aplicación el R. 2021/2116. Este introduce el sistema de monitorización de superficies como un elemento más del SICG (R. 2021/2116, Art. 66) y establece la obligación de que esté operativo (R. 2021/2116, Art 70).

2.2. La adopción y difusión de las innovaciones

De acuerdo con la definición del Manual de Oslo de 2018, "una innovación es un producto o proceso nuevo o mejorado (o una combinación de ambos) que difiere significativamente de los productos o procesos anteriores de la unidad y que ha sido puesto a disposición de los usuarios potenciales (producto) o puesto en uso por la unidad (proceso)" (OCDE y Eurostat, 2018, 246). Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con las ideas o los inventos, las innovaciones requieren ser implementadas; es decir, puestas a disposición para su uso (OCDE y Eurostat, 2018). En este sentido, la monitorización se puede conceptualizar, como un nuevo tipo de control (producto) que cuenta con una regulación propia que lo define como tal (R. 809/2014) y con unos procedimientos de trabajo específicos (Devos et al., 2018a; Devos et al., 2021; Luketić et al., 2021).

Levitt (1965) planteó la teoría del ciclo de vida del producto como una sucesión de 4 etapas establecidas en función de las ventas. La primera es la de introducción; en ella, se introduce el producto en el mercado, siendo adoptado por parte de usuarios innovadores. En la segunda, conocida como etapa de desarrollo, aumenta la demanda. La tercera etapa es la de madurez. En ella, el producto alcanza su mayor penetración en el mercado y los procesos productivos se encuentran muy perfeccionados. En la cuarta etapa, declive, el mercado del producto disminuye. Es frecuente que esto se deba a procesos de sustitución vinculados con la

aparición de nuevos artículos. Aunque las fases esenciales propuestas por Levitt (1965) pueden mantenerse utilizando criterios diferentes de las ventas (Shahmarichatghieh et al., 2015), también, pueden complementarse. Al respecto, puede añadirse una fase previa de conceptualización (Karlsson, 1988) y una final de desaparición, que se corresponde con la retirada del producto del mercado (Godás, 2006).

En cuanto a la difusión de las innovaciones, cabe destacar la teoría de Rogers (1962), que tiene en cuenta la adopción de las innovaciones en el medio social, y la teoría del entorno innovador postulada por Aydalot (1986). Rogers (1962) parte de la idea de que, en un entorno social, las innovaciones se difunden a través de la comunicación. En este contexto, la interacción entre los diferentes componentes del medio social y los canales de comunicación juegan un papel fundamental. En relación con esta cuestión, Karlsson (1988) puso de relieve que algunos canales de comunicación, como cursos y conferencias, son capaces de aumentar la velocidad de difusión. La teoría del entorno innovador, tal como señalan Aparicio et al. (2008) que aplicaron este marco teórico al estudio de procesos de innovación territorial, concibe la innovación como un "proceso geográficamente localizado y socialmente interactivo" (Aparicio et al., 2008, on-line). Esta teoría, en la que juegan un papel destacado el medio geográfico y los vínculos que existen entre los actores que lo integran, resulta de utilidad a la hora de analizar diferencias territoriales en relación con la adopción de las innovaciones.

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipos de controles

Los tipos de controles con los que se ha puesto en relación la monitorización son los controles sobre el terreno clásicos y los controles por teledetección. Los primeros, en esencia, llevan aparejada una inspección física de campo. Los segundos, se encuentran recogidos en el artículo 40 del R. 809/2014 y consisten en "una fotointerpretación de ortoimágenes (de satélite o aéreas) de todas las parcelas agrarias de cada solicitud de ayuda o solicitud de pago que deban someterse a inspección con el fin de reconocer los tipos de ocupación del suelo, y en su caso el tipo de cultivo, y medir las superficies" (R. 809/2014, Art. 40 a). Aunque, como principio general, se deben realizar inspecciones físicas de campo cuando la fotointerpretación no arroje resultados concluyentes (R. 809/2014, Art. 24.4). La muestra de expedientes a inspeccionar en el grueso de los regímenes de ayuda por superficie es del 5%. En el caso de las zonas sujetas a monitorización, se monitoriza el régimen de ayuda completo. El FEGA, como organismo que coordina los SIGC puede establecer convenios para que se realicen correctamente estos controles (RD 1075/2014, Art. 99.5).

3.2. Ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida del producto se ha realizado atendiendo a la evolución de la superficie en convenios de teledetección y la proporción de expedientes sujetos a controles clásicos y monitorización. Los datos de superficie se han tomado de los convenios de teledetección firmados entre las comunidades autónomas y el FEGA desde 2017. Los datos de expedientes monitorizados se circunscriben a las regiones con convenio de monitorización y los datos han sido facilitados por FEGA-Tragsatec; el porcentaje de expedientes en controles clásicos se ha estimado aplicando el 5% a los restantes. Adicionalmente, se han utilizado como elementos de apoyo el informe del SICG (FEGA, 2021b), las adendas de los convenios por teledetección y los convenios de monitorización publicados en el Boletín Oficial del Estado (BOE).

3.3. Implantación territorial de la monitorización

En el análisis de la implantación territorial de la monitorización en España, se ha considerado el territorio monitorizado en cada campaña y los regímenes de ayuda sujetos al control: se ha identificado el año de adopción de la monitorización en cada zona y, en las ayudas del primer pilar de la PAC, se ha analizado la evolución del número de regímenes monitorizados. En relación con la teoría del medio innovador, se han considerado las primeras adopciones, el número de proyectos existentes y las convocatorias de grupos de trabajo sobre la materia. En relación con la teoría de la difusión de las innovaciones, las nuevas incorporaciones y el papel del organismo de coordinación español, en lo que respecta a reuniones de trabajo, sistemas de gestión comunes y, como plasmación de los acuerdos resultantes de la interacción entre administraciones, los convenios de monitorización.

Las fuentes de datos utilizadas para identificar las áreas y regímenes monitorizados cada campaña han sido los trípticos sobre la PAC que publica el FEGA (FEGA, 2019a-2022a) y las notas sobre los controles por monitorización (FEGA, 2020b y 2021d). Adicionalmente, se ha utilizado información del Tribunal de Cuentas Europeo (TCE, 2020). El proceso de implantación se ha cartografiado utilizando las bases cartográficas del

Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2019). La información sobre número de proyectos se ha obtenido de las circulares de coordinación del FEGA (FEGA, 2020c). Las reuniones del Grupo de Trabajo de Monitorización consideradas han sido las publicadas en la página web del FEGA y, en cuanto a convenios de monitorización, los publicados en el BOE. Adicionalmente, se ha utilizado el Informe de Actividad del FEGA (2021c).

3.4. Análisis de costes

El análisis de los costes de cada tipo de control se ha efectuado tomando como referencia el precio medio por hectárea. Los importes de los controles por monitorización y teledetección se han calculado a partir de las cifras económicas de los convenios. En los controles por teledetección se ha tomado 2020 como referencia y el precio de la hectárea se ha derivado de la suma de los importes de los convenios y de la superficie inspeccionada. Esta se ha calculado ajustando la superficie total de las ventanas de teledetección con el porcentaje controlado realmente en un año tipo (2019). Las fuentes de datos han sido los convenios y el informe sobre la aplicación de los controles del SIGC (FEGA, 2021b). El precio de la hectárea monitorizada se ha derivado del importe del convenio de 2021 y la cifra de superficie monitorizada facilitada por FEGA-Tragsatec. Para la comparación, los importes se han deflactado a precios de mayo de 2022 (INE, 2022).

En el cálculo del precio de los controles clásicos no se ha podido disponer de una base de datos para el conjunto del territorio; únicamente se ha podido efectuar una aproximación a partir de datos de la Comunidad de Madrid (2016), la Región de Murcia (2017) y el Principado de Asturias (2019). Para ello, se han utilizado los importes que figuran en resoluciones de encargos a medios propios para efectuar controles clásicos y una estimación de la superficie inspeccionada. Los importes se han deflactado a precios de mayo de 2022 (INE, 2022). En los documentos de la Comunidad de Madrid y la Región de Murcia, se señala el número de recintos a inspeccionar en el encargo, la superficie inspeccionada se ha estimado combinando esta información con el tamaño medio del recinto en la región. Este último, se ha calculado utilizando datos de superficie declarada y número de líneas de declaración gráfica, facilitados por FEGA-Tragsatec. En el Principado de Asturias se ha utilizado el dato de superficie sujeta a controles clásicos que figura en el informe del SIGC (FEGA, 2021b). El precio por hectárea se ha derivado de la suma de los importes y de los datos de superficie.

4. RESULTADOS

4.1. Cambios en los tipos de control

En 2019, los controles sobre el terreno clásicos suponían menos de la mitad de la superficie controlada en el pago básico, un 44,88% del total (FEGA, 2021b). La mayor parte de las inspecciones se realizaban por teledetección. Pese a esto, entre 2019 y 2022, la monitorización ha sustituido a la teledetección (Figura 1). Los convenios entre el FEGA y las comunidades autónomas ponen de relieve este hecho. Desde el año 2020, en sus adendas, uno de los motivos que justifican las modificaciones es “la apuesta firme por la monitorización en detrimento de la teledetección de superficies” (MAPA, 2020, motivo segundo).

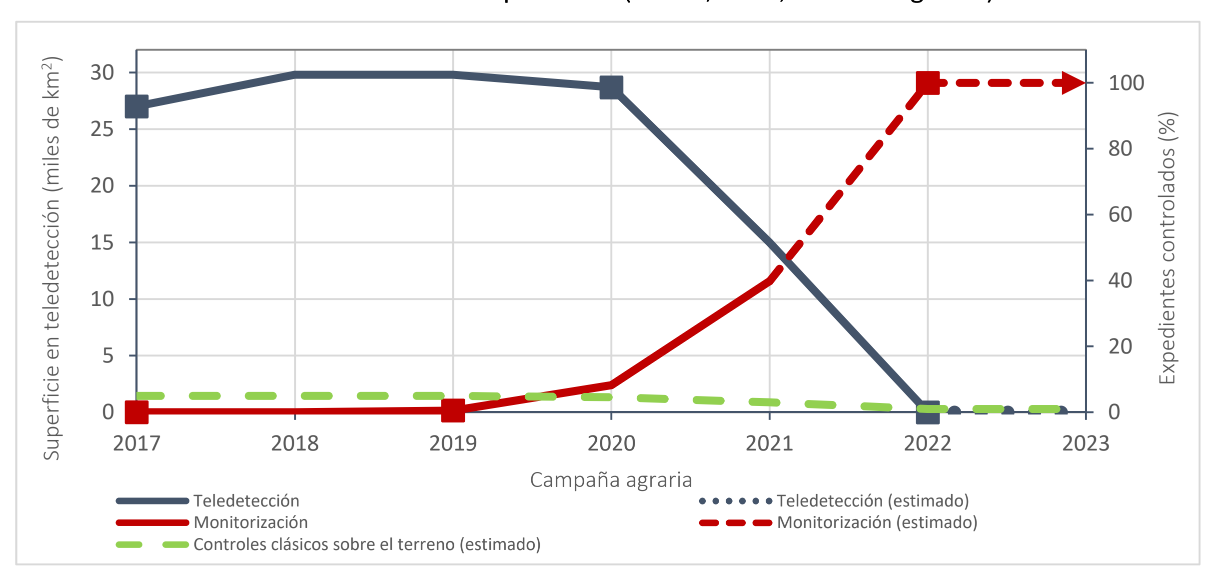


Figura 1. Implantación de cada tipo de control en España entre 2017 y 2023 (estimado). Fuente: elaboración propia con base en datos de FEGA-Tragsatec y FEGA (2022a). *Teledetección: superficie según convenios. Resto: proporción de expedientes de pago básico en áreas con convenio.

El periodo de transición hacia la monitorización presenta diferentes situaciones. Los controles clásicos muestran un declive mantenido a lo largo del tiempo. La teledetección, hasta 2020, se encontraba en fase de madurez: el número medio de comunidades autónomas con controles por teledetección se situaba en tono a 12 y la superficie de las ventanas era, aproximadamente, de 12.000 km^2. La situación varía sustancialmente en 2021; en esta campaña, se reduce a 6 el número de comunidades con teledetección y la superficie se reduce a la mitad. Este momento se corresponde con una etapa de declive del producto, que es total en 2022; momento en el que se abandona esta técnica de control. En el caso de la monitorización, la introducción se produce a partir de 2019. En la etapa de desarrollo, 2020-21, los organismos pagadores que adoptan la monitorización se multiplican, al igual que el número de expedientes monitorizados. Desde 2022, en regímenes como el pago básico, la cobertura de la monitorización es total; desde el punto de vista de la teoría del ciclo de vida del producto, puede hablarse de madurez.

4.2. Proceso de implantación territorial

El proceso de implantación territorial de la monitorización en España, aunque ha sido gradual, ha sido rápido. Este proceso se ha reproducido a nivel de organismo pagador; aunque ha habido excepciones como Aragón, región en la que se monitorizó todo su territorio desde un primer momento (Figura 2). Sin embargo, además de Aragón, existe una serie de comunidades autónomas innovadoras que ponen en marcha la monitorización, en 2019; estas son, por orden alfabético: Andalucía, Castilla y León, Cataluña y la Región de Murcia. Además, se pone en marcha en la Comunidad de Madrid, la Comunidad Foral de Navarra, la Comunitat Valenciana, Extremadura y Galicia. Por tanto, en España, desde un primer momento, la implantación de la monitorización parte de múltiples focos dispersos geográficamente. A esta dispersión geográfica se suma la existencia de 6 proyectos diferentes de monitorización (FEGA, 2020, 3).

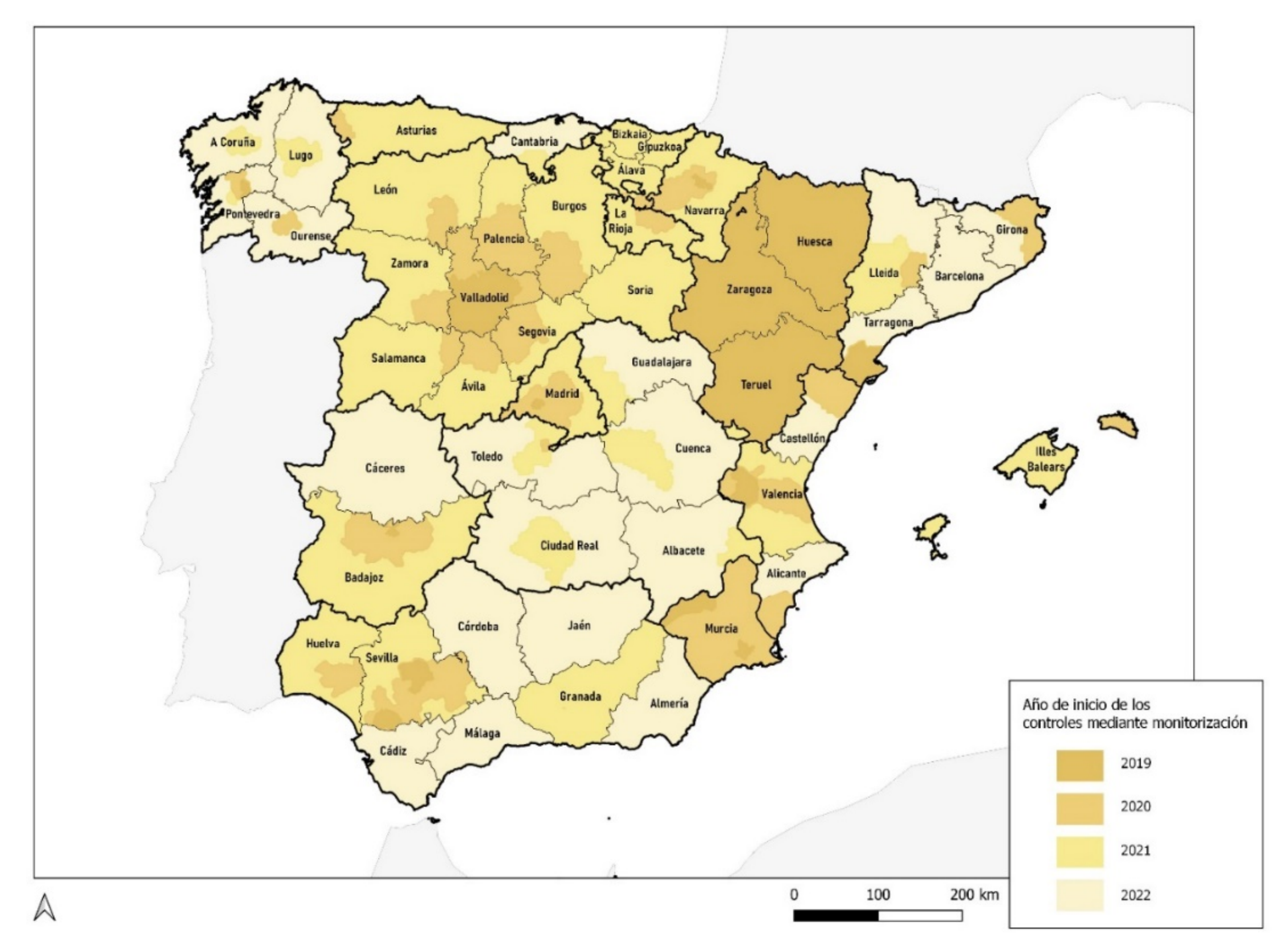


Figura 2. Año de inicio de los controles mediante monitorización. Fuente: Elaboración propia en base a FEGA (2019a-2022a, 2020b y 2021d), TCE (2020), IGN (2019).

En el proceso de puesta en marcha de la monitorización, se produjeron reuniones de grupos de trabajo organizadas por el FEGA, inicialmente, una en 2018 (conceptualización) y 4 en 2019 (introducción). En 2020, el número de comunidades que implementan la monitorización aumenta en 5. Las regiones que habían tenido monitorización en 2019, de forma coherente con los principios del *phasing-in*, incrementan la superficie monitorizada en 2020. En estas, frecuentemente, la difusión espacial se produce desde zonas monitorizadas en 2019 hacia áreas adyacentes. Sin embargo, en algunas regiones como la Comunitat Valenciana, además de observarse este tipo de acreción, se incorporan territorios no adyacentes. En las regiones en las que se había monitorizado todo el territorio en 2019, se incrementa el número de regímenes de ayuda monitorizados (Figura 3). En cuanto a coordinación e intercambio de conocimientos, a lo largo de la campaña de 2020 se producen 5 reuniones del grupo de trabajo de monitorización. En 2021, además de incorporarse Cantabria, la superficie monitorizada continúa aumentando y también el número de regímenes de ayuda: son numerosas las provincias en las que se monitorizan todos los regímenes de ayuda de los pagos directos y, en total, 8 comunidades lo hacen en todo su territorio. En 2021, se firman numerosos convenios entre el FEGA y las comunidades autónomas para poner en marcha la monitorización; estos incluyen las campañas de 2021 y 2022. Como resultado, en 2022, la monitorización en España -Península y Baleares- está totalmente implementada en todos los regímenes de pagos directos.

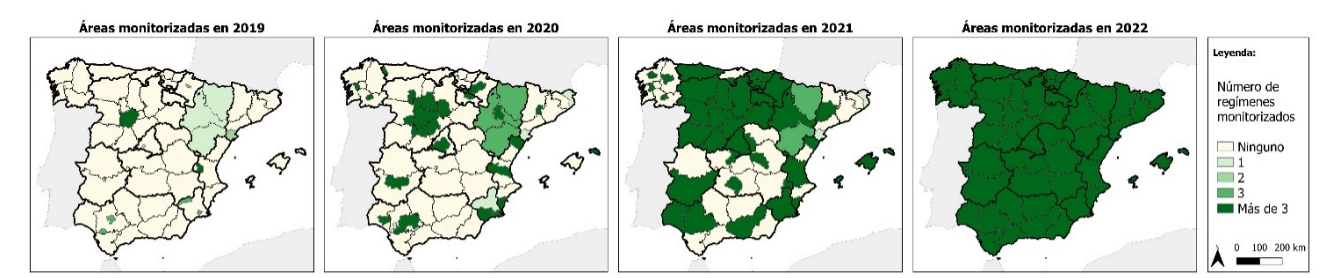


Figura 3. Evolución de las zonas y el número de regímenes de ayuda monitorizados. Pagos directos. Fuente: Elaboración propia en base a FEGA (2019a-2022a, 2020b y 2021d), TCE (2020), IGN (2019).

En el proceso de implantación de la monitorización, el papel del organismo de coordinación ha sido relevante, al respecto se han mencionado las reuniones de los grupos de trabajo y los convenios. Sin embargo, además, poner en marcha la monitorización requiere integrar diferentes resultados y procedimientos en los sistemas de gestión de ayudas. En España, la mayor parte de las regiones utiliza un mismo sistema denominado SGA (FEGA, 2021c). En este se han integrado aplicaciones específicas para la monitorización como SgaMon y aplicaciones móviles de fotografías georreferenciadas (FEGA, 2021c). Este sistema común permite la obtención de economías de escala. A modo de ejemplo, cabe mencionar las herramientas de reconocimiento de cultivos que ha desarrollado la empresa pública Tragsatec en colaboración con SGA (FEGA, 2021c); existiendo esta plataforma, es posible su utilización por múltiples comunidades autónomas sin que sea necesario que cada una de ellas realice un desarrollo propio que sería más difícil de amortizar, especialmente en aquellas de menor tamaño.

4.3. Efecto de la monitorización sobre los costes de los controles

La monitorización supone un importante ahorro por unidad de superficie. El precio por hectárea de la monitorización es 23,4 veces menor que el de los controles sobre el terreno clásicos y 6,84 veces más barato que el de los controles por teledetección. A su vez, el precio por hectárea de los controles por teledetección es 3,42 veces menor que el de los controles sobre el terreno clásicos, que son el tipo de control más caro de los que se han analizado (Figura 4). El ahorro que supone la utilización de imágenes de satélite, tecnologías de la información geográfica y procedimientos de automatización es muy elevado: el coste de inspeccionar el 5% de las solicitudes mediante controles clásicos, es superior al de inspeccionar el 100% mediante controles por monitorización. En 2019 se inspeccionaron en pago básico 1.100.048,32 ha, un 44,88% mediante controles clásicos y un 55,12% mediante controles por teledetección (FEGA, 2021b). Atendiendo a la estimación efectuada, el coste de estas inspecciones fue de 13.028.619,79€. El coste de inspeccionar esa misma superficie mediante monitorización es de 913.040,11€; un ahorro superior a los 12 millones de euros (12.115.579,68€). Inspeccionar el 100% de los expedientes supone una disminución del riesgo para los fondos. El coste de inspeccionar mediante monitorización el 100% de los expedientes de 2019 es de 1,35 veces el que supuso inspeccionar el 5% ese mismo año.

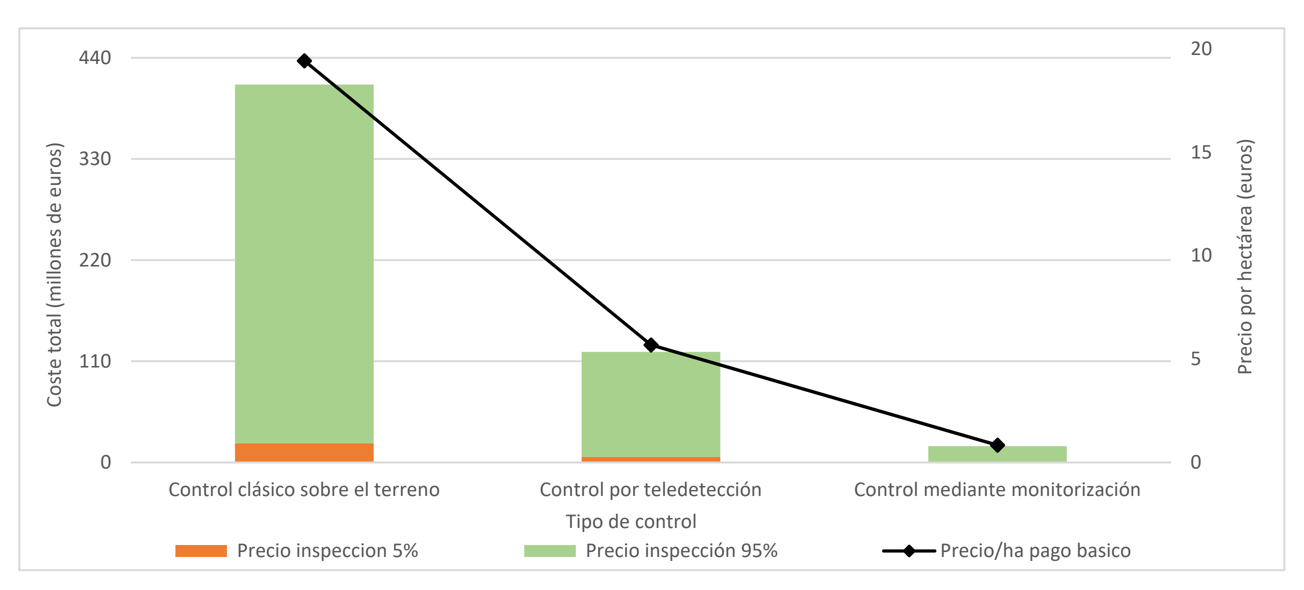


Figura 4. Precio por hectárea de cada control y coste de inspeccionar el 100% de los expedientes de pago básico. Fuente: elaboración propia a partir de precios estimados y superficie declarada (FEGA, 2021b). *Valores estimados. Importes expresados en euros de mayo de 2022.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En España, la monitorización se introdujo en 2019 y ha tenido un rápido desarrollo, reemplazando a otros controles como la teledetección. En cuanto a la primera hipótesis planteada, el proceso se ajusta bien al modelo planteado por Levitt (1965), en relación con la introducción en el mercado de un nuevo producto que presenta alguna ventaja competitiva. Chuvieco (2010) puso de relieve que la utilización de imágenes de satélite multiespectrales supone ventajas con respecto a otros medios de observación del territorio. En el caso de la monitorización, que además incluye medios de tratamiento automatizado, se ha comprobado que una de estas ventajas es la disminución de los costes por unidad de terreno inspeccionada. Esto confirma la hipótesis relativa a los costes; también, los planteamientos de Ehlers et al. (2021), en relación con la aparición de economías de escala vinculadas a la digitalización, y los de la CE y Ecorys (2018), en cuanto a una mayor cobertura de los controles sin un incremento proporcional de los costes. Adicionalmente, es necesario tener en cuenta que inspeccionar el 100% de los expedientes implica una reducción del riesgo financiero para el fondo; y que, dentro del enfoque participativo y no punitivo de la monitorización, la observación periódica en el marco de procedimientos automatizados puede dar lugar a la implementación de sistemas de avisos para ayudar a los agricultores en el cumplimiento de sus obligaciones (Devos et al., 2018), también señalar el momento óptimo de efectuar determinadas prácticas; esto puede ser útil tanto desde el punto de vista de la producción agraria como desde un enfoque medioambiental.

Respecto a la difusión de las innovaciones, segunda hipótesis: en relación con la aparición de medios innovadores, el año de introducción de la monitorización (2019) existen en España múltiples proyectos que, aunque bajo un mismo organismo de coordinación, se desarrollan de forma independiente en diferentes regiones. Tal como plantean Aparicio et al. (2008), los entornos innovadores, además de estar geográficamente localizados, son socialmente interactivos. En este trabajo no se han analizado los procesos de interacción social internos de cada organismo pagador; sin embargo, la primera cuestión sí ha quedado confirmada. No obstante, a nivel nacional, donde sí se han considerado los procesos de interacción, han existido grupos de trabajo organizados por el organismo de coordinación. El desarrollo específico que ha tenido la monitorización en España y la existencia de estos grupos, de acuerdo con el marco ofrecido por Aydalot (1986), permite considerar a España como medio innovador en la materia. Al respecto, es necesario tener en cuenta que, mientras España contaba con 10 organismos pagadores con monitorización, en 2019, únicamente se había implementado la monitorización en otros 4 países -Bélgica, Dinamarca, Italia y Malta- (TCE, 2020).

A diferencia de lo observado en el momento inicial de adopción, en la etapa de desarrollo de la monitorización han funcionado procesos adicionales. Atendiendo a la teoría de la difusión a través de canales de comunicación propuesta por Rogers (1962), en esta fase, los procesos de interacción se incrementan, se firman convenios de colaboración y, como resultado, aumenta el número de adoptantes. Por tanto, cabe señalar que, en la difusión de la monitorización, los procesos de interacción han jugado un papel esencial. Esta

idea es puesta de relieve por el propio organismo de coordinación español al señalar la importancia del "intercambio de conocimientos realizado tanto en los Grupos de Trabajo sobre Monitorización coordinados por FEGA O.A. como en los seminarios y conferencias organizados por DG AGRI y el JRC" (FEGA, 2020c, 3). Pese a esto, los procesos de difusión espacial de la monitorización, dentro de los organismos adoptantes, siguen el esquema del *phasing-in*. La monitorización tenía un carácter potestativo hasta la aplicación del R. 2021/2116; no obstante, una vez adoptada, debía seguirse la implementación gradual señalada por el RE. 2018/746. En este sentido, tanto la difusión hacia áreas adyacentes como la incorporación de áreas heterogéneas para ajustar procedimientos de trabajo son compatibles con el *phasing-in*.

En el pago básico, la monitorización se ha implementado totalmente en España. Pese a esto, puede cuestionarse que haya alcanzado una total madurez. Existen numerosos regímenes de ayuda, programas de desarrollo rural y condicionalidad que cuentan con requisitos específicos a integrar. Además, los nuevos requisitos de la PAC pueden producir cambios en los procesos de los actuales sistemas de monitorización. Por otro lado, en cuanto a economías de escala, el grado de estandarización puede aumentar, reduciendo los costes.

Desde la teledetección, la aplicación de tecnologías de la información geográfica en los controles de la PAC es constante. Delgado et al. (2008) plantean que la complementariedad entre diferentes tipos de capital intelectual refuerza la innovación. Una gestión adecuada de ello puede generar nuevas aplicaciones y sinergias. Al respecto, es fundamental ajustar la oferta de empleo al contexto tecnológico, contar con equipos multidisciplinares y perfiles transversales. En relación con esta cuestión, los geógrafos y otras disciplinas afines pueden jugar un papel importante.

A nivel europeo, teniendo en cuenta los resultados obtenidos respecto a costes, implementar la monitorización puede suponer un ahorro muy significativo. No obstante, para poder cuantificarlo con precisión es necesario efectuar una estimación más ajustada de los costes de cada tipo de control, valorando las diferencias entre países; también, cuantificar el coste que supone a los fondos no implementar la monitorización, es decir, el asociado a no controlar el 95% de los expedientes. Por otro lado, en relación con la innovación, la digitalización en el marco de la política agraria puede resultar muy útil en el desarrollo de los controles, pero también en el diseño de las propias políticas (Ehlers et al., 2021). Pese a ello, "el diseño, desarrollo e implementación de políticas está plagado de dificultades, y más aún cuando se requiere coordinación internacional" (OCDE y Eurostat, 2018, 3). Esto puede ser especialmente relevante a nivel europeo; sin embargo, además del principio de primacía del derecho de la Unión, la existencia de normativa y reglamentos claros, las guías del JRC y los grupos de trabajo son elementos que pueden facilitar su introducción.

6. BIBLIOGRAFÍA

Aparicio, J.; Sánchez, J. L.; Alonso, J. L.; Rodero, V, D. (2008). La Ribera Del Duero, Geografía De Un Medio innovador en torno a la vitivinicultura. *Scripta Nova*, 12, 277. http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-277.htm

Aydalot, P. (1986). *Milieux innovateurs en Europe*. París: GREMI, 24 p.

CE (Comisión Europea) y Ecorys (2018). *Analysis of administrative burden arising from the CAP*. Comisión Europea - Directorate-General for DG for Agriculture and Rural Development. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/dabd45ab-9baf-11e9-9d01-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-search

Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental*. Ed. Digital Reasons.

Comunidad de Madrid (2016). *Ejecución de los trabajos de campo de los controles sobre el terreno de las ayudas por superficie FEAGA en la comunidad de Madrid en 2016*. Comunidad de Madrid. https://www.comunidad.madrid/transparencia/encomienda-gestion/ejecucion-trabajos-campo-controles-terreno-ayudas-superficie-feaga-comunidad

Delgado Verde, M.; Navas López, J.E.; Martín de Castro, G.; López Sáez, P. (2008). Propuesta de un Modelo Teórico sobre el Proceso de Innovación Tecnológica Basado en los Activos Intangibles. Cuadernos de Estudios Empresariales, vol. 18, 203-227. https://revistas.ucm.es/index.php/CESE/article/view/CESE0808110203A/9356

Devos W., Sima A. and Milenov P. (2021). *Conceptual basis of checks by monitoring*, JRC127678. https://marswiki.jrc.ec.europa.eu/wikicap/images/8/87/JRC127678_final.pdf

Devos, W., Lemoine, G., Milenov, P., Fasbender, D., Loudjani, P., Wirnhardt, C., Sima, A. and Griffiths, P. (2018). *Second discussion document on the introduction of monitoring to substitute OTSC*. Publications Office of the European Union, Luxembourg, DOI:10.2760/344612.

Ehlers, M.H.; Huber, R.; Finger, R. (2021) Agricultural policy in the era of digitalisation. *Food Policy*, Vol. 100. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.102019.

FEGA (2019a). *Folleto divulgativo para los solicitantes de las Ayudas de la PAC en 2019*. https://www.fega.gob.es/sites/default/files/files/Triptico_Fega_SigPac_2019.pdf

FEGA (2020a). *Folleto divulgativo para los solicitantes de las Ayudas de la PAC en 2020*. https://www.fega.gob.es/sites/default/files/folleto_ayudas_pac_2020.pdf

FEGA (2020b). *Los controles por monitorización en la PAC*. https://www.fega.gob.es/sites/default/files/Controles_por_Monitorizacion_PAC_2020v2.pdf?token=PO9yVscx

FEGA (2020c). *Circular de coordinación 37/2020. Plan nacional de monitorización para verificar el cumplimiento de los criterios de admisibilidad de las superficies declaradas en la solicitud única 2020*. Fondo Español de Garantía Agraria, Subdirección General de Ayudas Directas. https://www.fega.gob.es/sites/default/files/AD-DES-CIRCULAR37-2020-PLAN_NACIONAL_CONTROLES_MONITORIZACION_2020.pdf

FEGA (2021a). *Folleto divulgativo para los solicitantes de las ayudas de la PAC en 2021.* https://www.fega.gob.es/sites/default/files/Folleto_SIGPAC_2021.pdf?token=qFA8t2Xf

FEGA (2021b). *Informe de estadísticas sobre la aplicación de los controles SIGC. Campaña 2019*. https://www.fega.gob.es/sites/default/files/CAMPANA_2019V2.pdf?token=4dwzVC6D

FEGA (2021c). *Informe de Actividad 2020*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. https://www.fega.gob.es/sites/default/files/Memoria_FEGA_2020.pdf

FEGA (2021d). *Controles por Monitorización de ayudas de la PAC en la Campaña 2021*. FEGA.

FEGA (2022a). *Folleto divulgativo para los solicitantes de las ayudas de la PAC en 2022.* https://www.fega.gob.es/sites/default/files/SIGPAC_demo%20final_3.pdf?token=fYhTQspa

FEGA (2022b). *Informes: distribución de pagos, total de las ayudas directas*. https://www.fega.gob.es/es/datos-abiertos/informes/ayudas-directas?title=AYUDIROOPP&field_ejercicio_feoga_value=2021

Ghazaryan, G.; Dubovyk, O.; Löw, F.; Lavreniuk, M.; Kolotii, A.; Schellberg, J.; Kussul, N. (2018). A rule-based approach for crop identification using multi-temporal and multi-sensor phenological metrics. *European Journal of Remote Sensing*. Vol. 51, 511-524. DOI: https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1455540

Godás, L. (2006). El ciclo de vida del producto. *Offarm*, Vol 25, núm. 8. 110:115. https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-el-ciclo-vida-del-producto-13094134

INE (2022). *Actualización de rentas con el IPC general*. https://www.ine.es/calcula/

Instituto Geográfico Nacional (2019). *Delimitación Territorial: líneas límite municipales*. CNIG. https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/busquedaSerie.do?codSerie=LILIM#

Karlsson, C. (1988). *Innovation adoption and the product life cycle*. Umeå Economic Studies No. 185 UNIVERSITY OF UMEÅ 1988. 232p. https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:792156/FULLTEXT01.pdf

Levitt, T. (1965). *Exploit the Product Life Cycle*, Harvard Bus. Rev. 43. 81-94.

López-Andreu, F. J., Erena, M., Dominguez-Gómez, J. A., & López-Morales, J. A. (2021). Sentinel-2 Images and Machine Learning as Tool for Monitoring of the Common Agricultural Policy: Calasparra Rice as a Case Study. *Agronomy*, 11(4), 621. https://doi.org/10.3390/agronomy11040621

Luketić, N.; Borio, B.; Devos, W.; Milenov, P. (2021) *Methodology: Checks by monitoring Quality Assessment v.1.2*. Ispra: European Commission. https://marswiki.jrc.ec.europa.eu/wikicap/images/9/90/TG_CbMQA_1_2_11062021.pdf

MAPA (2020). Resolución de 24 de agosto de 2020, del Fondo Español de Garantía Agraria, O.A., por la que se publica la Adenda de modificación al Convenio con la Generalitat Valenciana. *BOE*, núm. 241.

Murthy, C. S.; Raju, P. V.; Badrinath, K. V. S. (2003) Classification of wheat crop with multi-temporal images: performance of maximum likelihood and artificial neural networks, *International Journal of Remote Sensing*, 24:23, 4871-4890, DOI: 10.1080/0143116031000070490

Nègre, F. (2022). *Fichas técnicas sobre la Unión Europea - 2022: la financiación de la PAC.* Parlamento Europeo. https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/es/FTU_3.2.2.pdf

OCDE y Eurostat (2018), *Oslo Manual 2018*. OECD. Publishing, Paris/Eurostat, Luxembourg. https://doi.org/10.1787/9789264304604-en

Paredes-Gómez, V.; Gutiérrez, A.; Del Blanco, V.; Nafría, D.A. (2020). A Methodological Approach for Irrigation Detection in the Frame of Common Agricultural Policy Checks by Monitoring. *Agronomy*, 10, 867. https://doi.org/10.3390/agronomy10060867

Portalés-Julià, E.; Campos-Taberner, M.; García-Haro, F.J.; Gilabert, M.A. (2021). Assessing the Sentinel-2 Capabilities to Identify Abandoned Crops Using Deep Learning. *Agronomy*, Núm 11, 654. https://doi.org/10.3390/agronomy11040654

Principado de Asturias (2019) *Resolución de fecha 23 de mayo de 2019 por la que se autoriza, se dispone del gasto, se ordena la ejecución y se nombra director*. Consejería de Desarrollo Rural y R.N. https://sede.asturias.es/Proveedores/FICHEROS/ESTRUCTURA%202011/ENCARGOS%20A%20MEDIOS%20PROPIOS/Resolucion_Ordenacion_encargo_a_medio_propio_SET-19-020.pdf

Quarmby, N.A.; Milnes, M.; Hindle, T.L.; Silleos, N. (1993) The use of multi-temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction, *International Journal of Remote Sensing*, 14:2, 199-210, DOI: 10.1080/01431169308904332

Recuero, L.; Wiese, K. ; Huesca, M.; Cicuéndez, V.; Litago, J.; Tarquis, A.M.; Palacios-Orueta, A. (2019) Fallowing temporal patterns assessment in rainfed agricultural areas based on NDVI time series autocorrelation values. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 82, 101890. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.023.

Región de Murcia (2017). *Documentos contenidos en la propuesta que se somete a la aprobación del Consejo de Gobierno*. Región de Murcia. https://transparencia.carm.es/wres/transparencia/doc/Consejo_Gobierno/2017-12-28/Punto_17_Propuesta%20pago_TRAGSATEC.pdf

Rogers, E. (1962), *Diffusion of Innovations*, Free Press, Nueva York.

Shahmarichatghieh, M.; Tolonen, A.; Haapasalo, H. (2015) *Product Life Cycle, Technology Life Cycle and Market Life Cycle; Similarities, Differences and Applications*. Make learn and TIIM Joint conference 2015.

TCE (2020) *Utilización de nuevas tecnologías de formación de imágenes de superficie para supervisar la política agrícola común*. Tribunal de Cuentas Europeo. https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR20_04/SR_New_technologies_in_agri-monitoring_ES.pdf

Vyas, S. P., Oza, M. P., & Dadhwal, V. K. (2005). Multi-crop separability study of Rabi crops using multi-temporal satellite data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 33(1), 75-79.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 60-67

Obtención de series temporales de cubiertas de nieve (2021-2022) a partir de Teledetección y procesamiento automático de imágenes de cámaras web en la Cordillera Cantábrica

A. Melón-Nava[1]

[1] *Departamento de Geografía y Geología, Universidad de León. Campus de Vegazana s/n, 24071 León.*

amelon@unileon.es

RESUMEN: La detección de cubiertas de nieve es de especial interés para estudiar este importante recurso hídrico, analizar sus patrones de distribución, posibles tendencias y dinámica espaciotemporal a diferentes escalas. En la Cordillera Cantábrica, la nieve tiene una gran variabilidad espacial y temporal. Se propone una metodología para la generación de series temporales de cubiertas de nieve, basada en teledetección y en el uso de cámaras web (*webcam)*. El procesamiento de las imágenes satelitales (MODIS-Terra y Sentinel-2) es realizado a partir de *Google Earth Engine* y lenguaje R.

De manera auxiliar, el uso de imágenes de *webcam* de más de 50 emplazamientos permite tomar registros de la cubierta de nieve en superficie, utilizadas para validar las observaciones satelitales. Con estas imágenes, se mejora notablemente la resolución temporal de las observaciones, pudiendo obtener varias imágenes diarias. Además, no se ven afectadas por la presencia de nubes, a diferencia de las imágenes satelitales.

Las series temporales de cubiertas de nieve obtenidas en superficie a partir de las *webcams* son esenciales para conocer la dinámica de la nieve en la Cordillera Cantábrica. La intercalación de episodios de nevadas y rápidos deshielos provocan que la resolución temporal de las imágenes de satélite utilizadas no consiga reflejar la dinámica nival de manera completa, especialmente en los sectores de menor permanencia de la cubierta nival.

Palabras-clave: cubierta de nieve, teledetección, Cordillera Cantábrica, cámara web.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la cubierta de nieve en la Cordillera Cantábrica resulta de elevado interés, por su importante papel a nivel hidrológico, biogeográfico e incluso socioeconómico, al ser un factor indispensable, por ejemplo, para el turismo de nieve. Su acumulación supone un riesgo natural, cuando se generan aludes que pueden ocasionar daños en infraestructuras, e incluso, pérdidas humanas.

El estudio de la nieve en áreas montañosas de la Península Ibérica ha sido considerado mediante múltiples enfoques y a diferentes escalas. En Pirineos se han analizado el impacto del cambio climático en la criosfera, analizando cubiertas de nieve en distintas temporadas y relacionándolo con patrones de teleconexión (Bonsoms et al., 2021) y se han realizado predicciones para las próximas décadas en un contexto de progresivo calentamiento que sugieren cambios que afectarían notablemente a la duración de la cubierta de nieve y su equivalente en agua (*SWE*) (López-Moreno et al., 2008).

Estudios desarrollados en la Cordillera Cantábrica han destacado su importancia como agente morfogenético, capaz de generar cambios en los patrones de escorrentía y procesos de solifluxión por acción de la fusión de la nieve (Pisabarro, 2020; Serrano et al., 2018). González Trueba y Serrano (2010) describen la dinámica de la nieve en Picos de Europa, destacando su papel como agente de modelado y definiendo las formas de relieve que pueden generar los nichos de nivación en diferentes ambientes.

La Teledetección, entendida como la técnica aplicada para adquirir información de la superficie terrestre a partir de sensores aéreos o espaciales (Chuvieco, 2006), se plantea en este estudio como una herramienta de obtención de información para el conjunto de la cordillera, aunque puede ser aplicada tanto a grandes extensiones como a escala local. Esta técnica ha sido utilizada, por ejemplo, en Sierra Nevada para la detección de presencia de cubiertas de nieve a través de sensores térmicos (Santos, 2016).

1.1. Objetivos

Este estudio tiene como objetivo general la adquisición de series temporales de cubiertas de nieve a partir del uso de imágenes satelitales y de imágenes tomadas en campo mediante cámaras web. Otro objetivo adicional es la comparación de ambos métodos, teniendo en cuenta sus ventajas y limitaciones para la detección de la cubierta nival.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La Cordillera Cantábrica es una cadena montañosa situada en el norte de la Península Ibérica. Se extiende longitudinalmente (en dirección O-E) a lo largo de unos 300 kilómetros y separa el Mar Cantábrico de la Submeseta Norte. Es un espacio con una marcada asimetría entre vertientes y sectores, con importantes diferencias estructurales y geomorfológicas (Gómez-Villar et al., 2011). Ello se traduce en diferentes matices climáticos y una elevada diversidad paisajística.

El área de estudio se localiza tomando como extremo occidental la Sierra de Ancares, en el este de la provincia de Lugo y oeste de la provincia de León. La Cordillera Cantábrica se extiende por el norte de León y Palencia, sur de Asturias y Cantabria y sector noroccidental de la provincia de Burgos, donde los Valles Pasiegos cántabros y burgaleses marcan el límite oriental.

Los sectores de mayor altitud son Picos de Europa (Torre Cerredo – 2650 m), Macizo de Fuentes Carrionas (Peña Prieta – 2538 m), Macizo de Ubiña (Peña Ubiña - 2417 m), la Sierra de Híjar (Cuchillón – 2222 m), el Macizo de Mampodre (Peña de la Cruz – 2196 m), la Sierra de Gistredo (Catoute – 2117 m), la Sierra de Ancares (Pico Cuiña – 1987 m) o las Montañas Pasiegas (Castro Valnera – 1718 m).

La Cordillera Cantábrica se caracteriza por la disposición longitudinal de las mayores altitudes que forman la divisoria de manera casi paralela a la línea de costa cantábrica. Este hecho genera grandes diferencias entre vertientes durante las nevadas, especialmente cuando se produce la entrada de masas de aire ártico marítimas. Este tipo de situaciones generan nevadas con flujo de viento de componente norte, y producen una marcada diferencia en las precipitaciones en forma de nieve entre la vertiente norte y sur de la Cordillera, como consecuencia del efecto *Foehn*.

Además, la cubierta de nieve es muy irregular a lo largo de la Cordillera Cantábrica como consecuencia de su extensión. Cada patrón sinóptico genera situaciones diferentes que afectan de manera desigual a distintos sectores, siendo además comunes desfases de varios centenares de metros en la cota de nieve entre ellos.

3. METODOLOGÍA

Para la detección de cubiertas de nieve se han empleado dos metodologías: el uso de imágenes de cámaras web e imágenes satelitales. El flujo de trabajo (Figura 1) explica el procesamiento realizado a las imágenes, que es descrito con mayor detalle en los apartados 3.1 y 3.2.

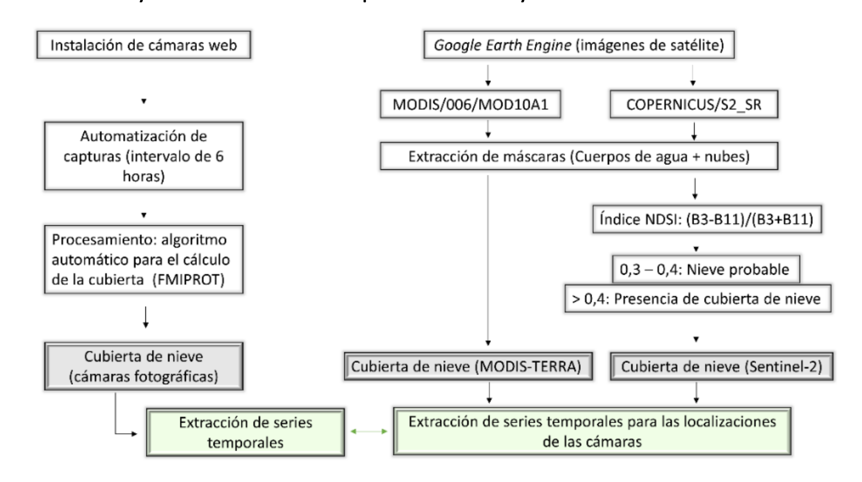


Figura 1. Flujo de trabajo.

Se han analizado las cubiertas nivales de todos los puntos en que se sitúan cámaras, aunque se ha extraído la cubierta nival diaria para 3 localizaciones representativas de distintos sectores de la cordillera en

que la toma de imágenes ha sido continua para todo el periodo temporal analizado (Figura 5). Las localizaciones presentan diferencias entre sí de la cubierta de nieve, como consecuencia de encontrarse en diferentes sectores de la cordillera y a diversas altitudes.

3.1. El uso de imágenes satelitales tomadas mediante Teledetección

El uso de imágenes satelitales permite registrar información de la superficie terrestre en amplias extensiones, lo que favorece el estudio de la evolución de la cubierta de nieve a nivel de toda la Cordillera Cantábrica. Se han analizado imágenes satelitales pertenecientes al periodo octubre de 2021 a mayo de 2022, con el fin de disponer de un marco temporal comparable al registrado con las imágenes de cámaras web.

En cuanto a la selección de las fuentes satelitales empleadas, es importante tener en cuenta las resoluciones espaciales, temporales y radiométricas de los sensores utilizados.

Se han utilizado dos productos satelitales (Tabla 1), pertenecientes a los satélites Terra y Sentinel-2, disponibles en el catálogo de *Google Earth Engine*.

En este estudio, se ha descartado el uso de imágenes de Landsat, ya que su periodo de revisita es superior a 15 días y es insuficiente para el rango temporal analizado, que se ve limitado además por la presencia de cubierta nubosa en gran parte de las imágenes.

Tabla 1. Características de los productos satelitales utilizados en la plataforma *Google Earth Engine*

Producto utilizado	*Proveedor*	*Resolución espacial*	*Resolución temporal*	*Banda utilizada*	*FUENTE*
MOD10A1.006	NASA NSIDC DAAC at CIRES	500m	1 día	NDSI_Snow_Cover	Hall et al., 2016
Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A	European Union/ESA/Copernicus	10 m (B3) 20 m (B11)	2-3 días	B3 y B11 (NDSI)	Copernicus Sentinel data (2022)

Los productos satelitales fueron procesados a partir de la plataforma *Google Earth Engine,* lo que favorece la ejecución masiva de toda la colección de imágenes analizadas, desde noviembre de 2021 hasta mayo de 2022. La principal ventaja de esta plataforma es que el procesamiento de las imágenes se realiza en su propio servidor, sin necesidad de descarga de las imágenes, por lo que conlleva un bajo coste computacional para el usuario.

En el caso del producto de TERRA-MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer),* se ha utilizado la banda referida a la cubierta de nieve (*NDSI_Snow_Cover)*, previo enmascaramiento de las zonas cubiertas por láminas de agua (embalses) y de las zonas cubiertas por nubes en cada imagen. El producto ofrece en cada imagen un rango de valores de 0 a 100, siendo 100 aquellos píxeles con una mayor probabilidad de estar cubiertos por nieve. Se han determinado los umbrales que mejor se ajustaban visualmente a la presencia de la cubierta de nieve: los valores inferiores a 33 han sido considerados como píxeles sin nieve, los valores entre 33 y 66 como píxeles con presencia de nieve probable/discontinua y los píxeles con valores superiores a 66 han sido considerados como de cubierta nival completa.

Para las imágenes de Sentinel-2, se ha realizado el mismo proceso de extracción de máscaras que en el caso del producto de Terra-MODIS. Posteriormente, se han extraído las bandas 3 (banda verde) y 11 (banda infrarroja cercana) para realizar el Índice Diferencial Normalizado de Nieve, NDSI (*Normalized Difference Snow Index)* (Hall y Riggs, 2011). Este índice espectral permite extraer los píxeles en los que la superficie se encuentra bajo cubierta de nieve, a partir de un umbral. El índice NDSI genera un ráster a partir de la imagen satelital con valores entre -1 y 1. Se ha utilizado el valor 0,4 como umbral a partir del cual se determina que un píxel está cubierto por nieve, de acuerdo con otros estudios como Andrew et al., 1998 o Shea, 2017. Se han tomado valores entre 0,3 y 0,4 para determinar zonas con cubierta de nieve discontinua o probable.

$$\mathrm{NDSI} = \frac{\rho(\mathrm{VIS}) - \rho(\mathrm{SWIR})}{\rho(\mathrm{VIS}) + \rho(\mathrm{SWIR})} = \frac{B_3 - B_{11}}{B_3 + B_{11}} \quad (1)$$

donde ρ es la reflectancia, VIS es la banda verde del canal visible y SWIR es la banda infrarroja cercana. En Sentinel-2 se corresponden con las Bandas 3 y 11, respectivamente.

3.2. El uso de Imágenes de cámaras web (*webcam)* para el seguimiento de la cubierta nival

Las imágenes tomadas en diversos emplazamientos de la Cordillera Cantábrica permiten un seguimiento de la cubierta nival a nivel local con independencia del tipo de situación meteorológica, lo que favorece la continuidad de los datos registrados.

Se han instalado una veintena de cámaras, de dos tipos: la mayoría son cámaras web IP (modelos Foscam FI9800P y Zeetopin ZS-GX5S). Se localizan en emplazamientos provistos de conexión Wi-Fi, que permiten un seguimiento en remoto de la cubierta de nieve. También se han instalado cámaras de fototrampeo (modelo Aperman H55), en lugares más inaccesibles en los que no era posible disponer de transmisión de los datos. Este tipo de cámaras han sido programadas para realizar fotografías con un intervalo de 6 horas, y las imágenes son recogidas manualmente al final de la temporada invernal.

Otra fuente de imágenes son las cámaras web públicas disponibles en diversas plataformas, como los portales de las estaciones de esquí de la Cordillera Cantábrica. La descarga de las imágenes ha sido semiautomatizada, de manera que una imagen es descargada cada 6 horas a partir de su dirección web (URL). Existen cámaras cuya URL no permite la descarga automática de imágenes, por lo que son realizadas manualmente solo durante episodios de nevadas.

Las imágenes obtenidas son procesadas masivamente a partir de un software específico, FMIPROT (*Finnish Meteorological Institute Image Processing Toolbox)*, que permite el procesamiento masivo de las imágenes. Incluye algoritmos para la detección de variables como la fracción de cubierta de nieve (Salvatori et al., 2011) o el cálculo de espesores a partir de elementos de referencia. Este programa está desarrollado en código abierto por el *Finnish Meteorological Institute (*Tanis et al., 2018*)* y está escrito en lenguaje Python. La cubierta de nieve es reclasificada posteriormente para obtener 3 tipos de situaciones: ausencia de cubierta de nieve, cubierta parcial o cubierta completa de nieve (Figura 2). Requiere la clasificación de las imágenes a partir de su localización, por lo que son guardadas con un formato común: "<Nombre >_%Y%m%d_%H%M%S.jpg", de manera que el emplazamiento y la fecha puedan ser fácilmente reconocidos para su procesamiento.



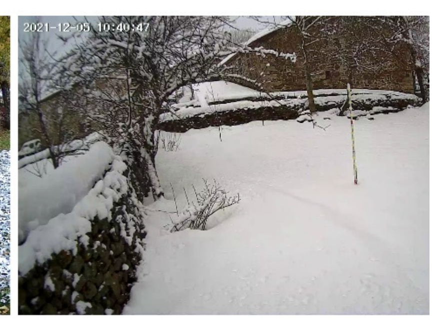


Figura 2. Ejemplo de ausencia de cubierta de nieve, cubierta parcial y cubierta completa. Santa María de Redondo (Palencia). Imágenes de la temporada 2021-2022.

Las imágenes requieren un preprocesamiento, de manera que algunas imágenes son descartadas, como las imágenes nocturnas, borrosas, o aquellas con zonas con alto brillo por sol directo. Las imágenes deben ser alineadas a partir de elementos de referencia en caso de que la cámara sufra pequeños balanceos.

En total, se han recogido más de 20.000 imágenes en 90 emplazamientos entre octubre de 2021 y mayo de 2022, periodo de duración de las nevadas en la mayoría de los emplazamientos. En alguno de ellos, se han instalado pértigas graduadas, con el fin de registrar además los espesores de la nieve. El software permite escoger uno o varios ROI (*Region of Interest),* en los que se puede centrar el análisis (Figura 3).

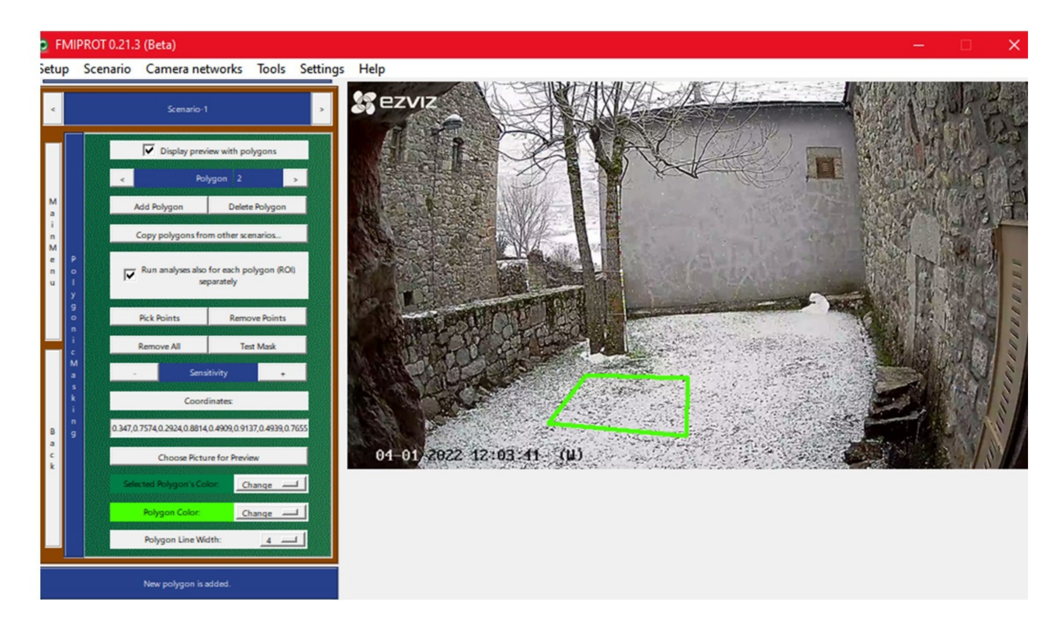


Figura 3. Ejemplo de utilización de FMIPROT, mediante la selección de un área de interés (ROI) en una imagen de la Cueta (León)

La principal limitación del uso de imágenes de *webcam* es la pérdida de conexión de algunas cámaras durante fuertes temporales, así como el movimiento y balanceo de algunas cámaras, que provoca que algunas hayan sido descartadas para el análisis de las imágenes.

Generalmente son cámaras situadas en entorno de localidades de montaña, en zonas llanas, con suelos provistos de vegetación y tratando de que se sitúen en zonas lo menos venteadas posible. Algunas observaciones de cámaras web han sido recogidas en los límites exteriores de la Cordillera, con el fin conocer la extensión de las nevadas, o para ayudar a realizar estimaciones de la cota de nieve por sectores. La distribución de las cámaras se recoge en la Figura 4. La mayoría de las cámaras web están situadas entre los 500 metros de altitud y 1800, siendo la cámara del refugio de Collado Jermoso (Picos de Europa – León), la situada a una mayor altitud, superior a los 2000 m s.n.m.

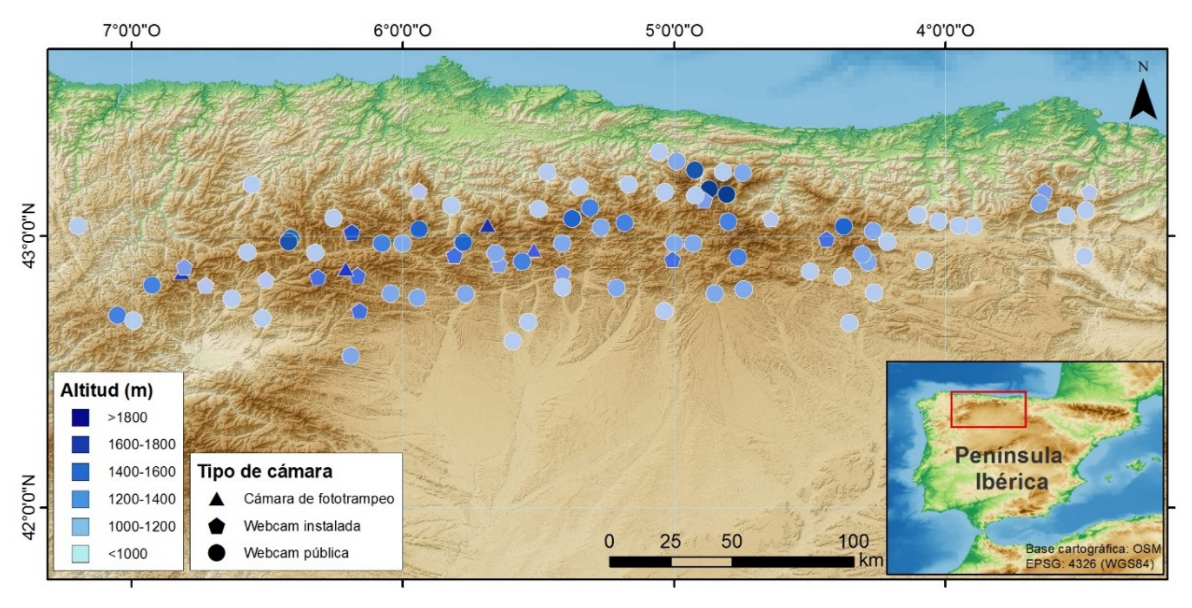


Figura 4. Mapa de localización de las cámaras web y de fototrampeo instaladas, así como cámaras públicas analizadas.

4. RESULTADOS

La extracción de series temporales, a partir de teledetección y mediante las cámaras web permite la comparación de ambos métodos en los lugares en que se sitúan las cámaras. La detección de cubiertas de nieve a partir de imágenes de satélite se ha visto muy limitada por la continua presencia de cubiertas nubosas en la práctica totalidad de la Cordillera Cantábrica. Para las imágenes de MODIS (resolución diaria), un 58,6% de las observaciones en todos los emplazamientos han sido omitidas por la presencia de nubes. Este hecho se produce en las imágenes de ambas plataformas satelitales, aunque provoca una mayor ausencia de datos en las imágenes de Sentinel-2, ya que su resolución temporal es de 2-3 días, frente a MODIS-Terra, con resolución diaria.

En la comparativa entre las 3 fuentes de información (MODIS, Sentinel-2 y las imágenes de las cámaras) se obtiene que existen múltiples diferencias entre los métodos, y que es precisamente durante los episodios de nevadas registradas por las cámaras, cuando se produce una mayor ausencia de datos de las plataformas satelitales, como consecuencia de una mayor cubierta nubosa (Figura 5). Es tan solo tras los episodios de nevadas, y durante situaciones atmosféricas más estables, cuando los métodos ofrecen resultados similares.

En el caso de la Vid de Gordón, situado en el valle del río Bernesga, en la Montaña Central Leonesa, es el emplazamiento que tiende a registrar un menor número de días de cubierta nival. Gran parte de las situaciones de nevadas analizadas en esta zona mediante las imágenes de las cámaras web provocan un establecimiento de la cubierta de nieve en el suelo de corta duración, llegando a durar tan solo unas horas, y retirándose en episodios de rápido deshielo. Este hecho, unido a una menor resolución temporal de las imágenes de satélite, genera una menor detección de la cubierta nival por parte de estas.

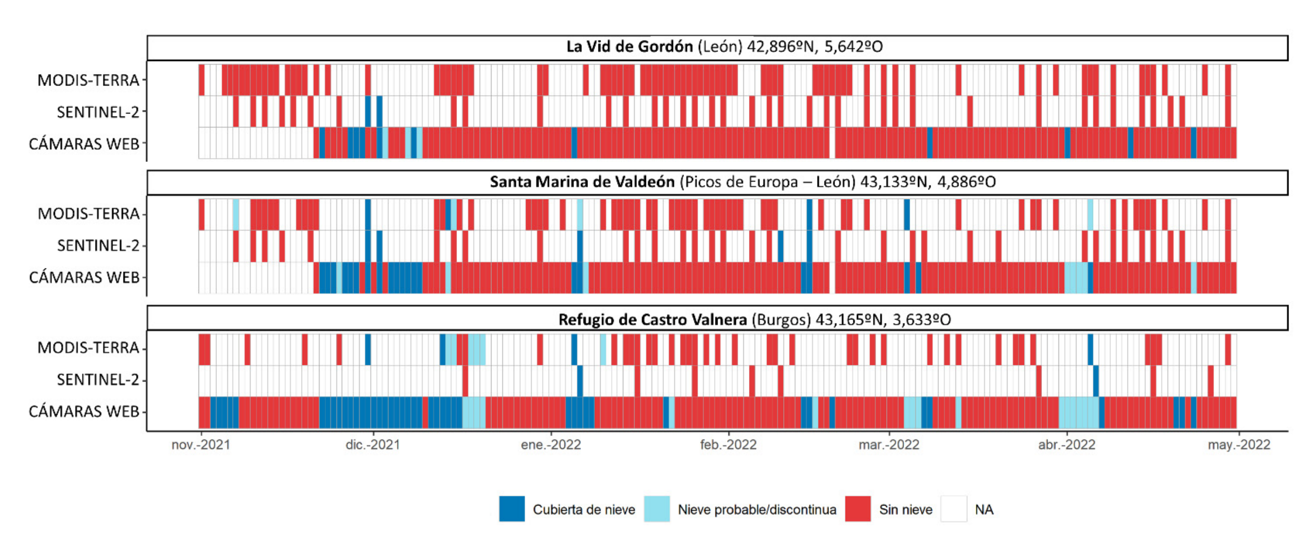


Figura 5. Evolución diaria de la cubierta de nieve en 3 emplazamientos de la Cordillera Cantábrica a partir de imágenes de satélite (MODIS-TERRA, Sentinel-2) y la toma de imágenes de cámaras web.

La presencia de largos periodos cubiertos por nubosidad genera ausencias de datos parciales (si las nubes cubren solo una parte de la cordillera) o totales (si se encuentra cubierta en su totalidad). La utilización de puntos de muestreo de imágenes a lo largo de la Cordillera Cantábrica permite suplir esta ausencia de información (Figura 6), aunque con la limitación de que solo se pueden recoger datos espacialmente puntuales.

5. DISCUSIÓN

El seguimiento de la cubierta de nieve en la Cordillera Cantábrica se ha realizado a partir de diversas herramientas, si bien ambas cuentan con una serie de ventajas e inconvenientes. En cuanto a las imágenes satelitales, permiten realizar un seguimiento de toda la cordillera en su conjunto, siempre y cuando esta se encuentre libre de la cubierta nubosa. El uso de Terra-MODIS puede resultar adecuado para realizar un seguimiento de la cubierta nival en un amplio rango temporal y espacial, ya que sus imágenes están disponibles desde el año 2000 de manera diaria y con una resolución espacial de 500 metros, insuficiente para el estudio de la cubierta a escala local. Las imágenes de Sentinel-2 cuentan una resolución temporal menor (en torno a 2-3 días) y sus imágenes están disponibles desde el año 2015. Sin embargo, su resolución espacial (de unas

pocas decenas de metros) puede resultar favorable para analizar la cubierta de nieve a más local.

El uso de imágenes de cámaras web permite realizar un seguimiento de la cubierta de nieve en localizaciones concretas, pero con observaciones temporalmente continuas. Permiten observar de manera más detallada la dinámica de la cubierta nival.

En la Cordillera Cantábrica, por su disposición geográfica y características climáticas, se generan rápidas fluctuaciones de la cubierta nival, con episodios de nevadas acompañados de rápidos periodos de fusión, que generan una enorme variabilidad de la cubierta de nieve, especialmente en zonas medias y periféricas de la cordillera. Por ello, la presencia de puntos de observación de la cubierta de nieve mediante cámaras web puede resultar más interesante en estas zonas de mayor dinámica, mientras que las observaciones satelitales, por su resolución temporal, pueden ser de mayor interés en las zonas de mayor permanencia y estabilidad del manto nival, tales como las zonas de mayor altitud y cumbres.

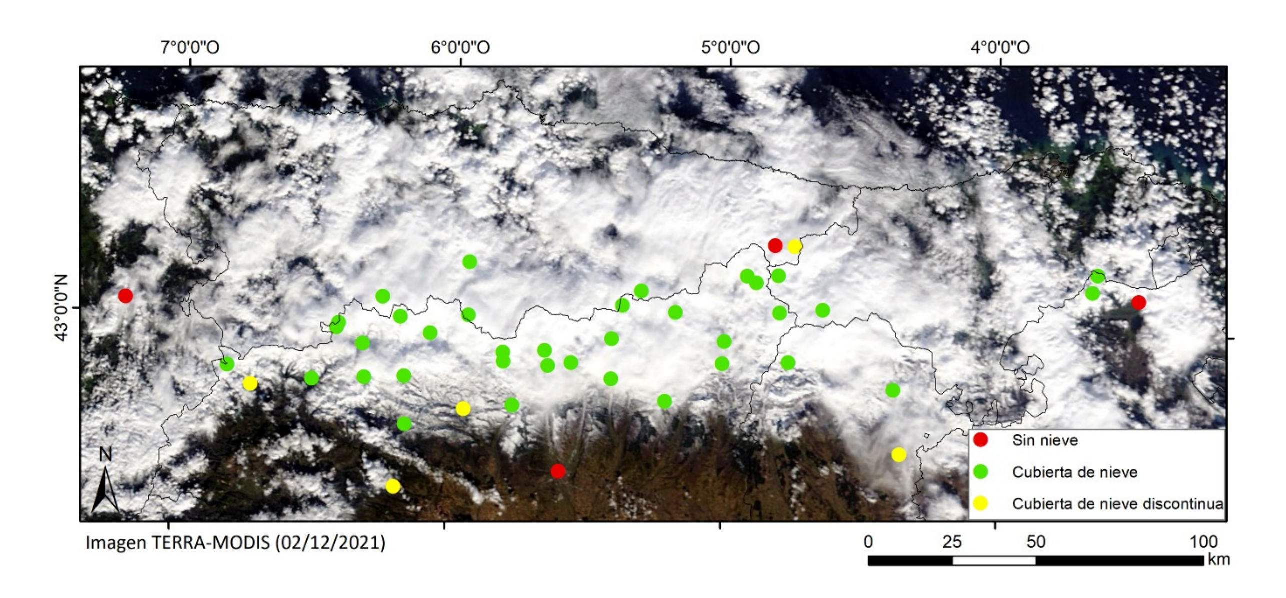


Figura 6. Uso de las cámaras web para detectar cubiertas de nieve durante un periodo de nubosidad.

6. CONCLUSIONES

La extracción de series temporales de cubiertas de nieve en la Cordillera Cantábrica ha sido llevada a cabo mediante dos metodologías: el uso de observaciones satelitales y la toma de imágenes con cámaras web en puntos concretos de la cordillera.

Se ha puesto de manifiesto diversas problemáticas asociadas a la generación de estas series temporales. Por una parte, el uso de imágenes de satélite provoca periodos de ausencia de datos como consecuencia de la presencia de cubiertas de nubes, especialmente durante episodios de nevadas, en los que la cubierta nival sufre una gran variabilidad en algunos sectores. La resolución temporal en que se obtienen las imágenes de satélite complementa esta problemática, y parece no ser suficiente para mostrar dicha variabilidad del manto nival, que en ocasiones sufre rápidos procesos de fusión en pequeños periodos de tiempo.

El seguimiento de la cubierta de nieve mediante cámaras web en superficie, permite complementar el uso de imágenes de satélite, favoreciendo una mejor resolución temporal de las observaciones, que pueden ser tomadas bajo cualquier tipo de situación atmosférica, por lo que no se ven afectadas por los periodos de nubosidad.

AGRADECIMIENTOS

Adrián Melón-Nava es Personal Investigador Predoctoral en Formación en el Departamento de Geografía y Geología de la Universidad de León con un contrato FPU del Ministerio de Universidades (FPU20/01220).

Al Dr. Javier Santos-González y a la Dra. Amelia Gómez-Villar, su apoyo en la instalación del equipo fotográfico que ha permitido realizar este trabajo, así como su supervisión prestada.

Al grupo de investigación GEOPAT y al Servicio de Cartografía de la Universidad de León, por su apoyo

logístico para el desarrollo de este trabajo.

7. BIBLIOGRAFÍA

Andrew G. K., Hall, D. K. y Riggs, G. A. (1998). Global snow cover monitoring using MODIS. Ponencia en el 27º Simposio Internacional de Teledetección del Medio Ambiente de Tromso. 8-12 de junio, pp. 363-366.

Bonsoms, J., Gonzalez, S., Prohom, M., Esteban, P., Salvador-Franch, F., López-Moreno, J. I., y Oliva, M. (2021a). Spatio-temporal patterns of snow in the Catalan Pyrenees (NE Iberia). *International Journal of Climatology*, 41 (12), Pages 5676-5697. https://doi.org/10.1002/joc.7147

Chuvieco Salinero, E. (2006). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio* (2ª ed. [act.]). Barcelona. Ariel.

Da Ronco, P., Avanzi, F., De Michele, C., Notarnicola, C., y Schaefli, B. (2020). Comparing MODIS snow products Collection 5 with Collection 6 over Italian Central Apennines, *International Journal of Remote Sensing,* 41 (11), 4174-4205, doi: 10.1080/01431161.2020.1714778, 2020.

Gómez-Villar, A.G., González-Gutiérrez, R.B., Redondo-Vega, J.M., Santos-González, J. (2011). Distribution of relict rock glaciers in the Cantabrian Mountains (León, Spain). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 37 (2): 49-80. http://dx.doi.org/10.18172/cig.1256

Hall, D. K., V. V. Salomonson, and G. A. Riggs. (2016). MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid. Version 6. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD10A1.006

Hall, D.K., Riggs, G.A. (2011). Normalized-Difference Snow Index (NDSI). In: Singh, V.P., Singh, P., Haritashya, U.K. (eds) Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_376

López-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M. & Alvera, B. (2008). Sensitivity of the snow energy balance to climatic changes: prediction of snowpack in the Pyrenees in the 21st century. *Climate Research*, 36 (3): 203-217. http://dx.doi.org/10.3354/cr00747

Pisabarro, A. (2020). Snow cover as a morphogenic agent determining ground climate, landforms and runoff in the Valdecebollas massif, Cantabrian Mountains. *Geographical Research Letters*, *46*(1), 81–102. https://doi.org/10.18172/cig.3823

Salvatori, R., Plini, P., Giusto, M., Valt, M., Salzano, R., Montagnoli, M., Cagnati, A., Crepaz, G. and Sigismondi, D. (2011). Snow cover monitoring with images from digital camera systems. *Ital. J. Remote Sens*, 43(6).

Santos, B.M. (2016). *Cubierta Nival y Temperaturas de Superficie en Sierra Nevada a través del tratamiento digital de imágenes de satélite*. Universitat de Barcelona.

Serrano Cañadas, E., Oliva, M., González-García, M., López-Moreno, J. I., González-Trueba, J., Martín-Moreno, R., Palma, P. (2018). Post-little ice age paraglacial processes and landforms in the high Iberian mountains: A review. *Land Degradation and Development*, *29*(11), 4186–4208. https://doi.org/10.1002/ldr.3171

Shea, J. (2017). Climate Change, Glacier Response, and Vegetation Dynamics in the Himalaya: Contributions Toward Future Earth Initiatives. *Mountain Research and Development* 37(3). https://doi.org/10.1659/mrd.mm209

Tanis, C.M.; Arslan, A.N. (2017). *Finnish Meteorological Institute Image Processing Toolbox (Fmiprot) User Manual*; Zenodo: Genève, Switzerland.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 68-77

¿Hacia incendios más severos? Tendencias en la severidad de los incendios en Aragón entre 1975 y 2020

R. Montorio[1], *F. Pérez-Cabello*[1], *A. Acosta-Ruiz*[1]

[1] *Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio-Instituto Universitario en Ciencias Ambientales de Aragón, Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50.009 Zaragoza.*

montorio@unizar.es, fcabello@unizar.es, 858247@unizar.es

RESUMEN: La severidad de los incendios es un componente importante del régimen de fuego por su influencia en la respuesta y recuperación de los espacios afectados. Evaluar sus tendencias es fundamental para conocer si las actuales características son o no propias de los diferentes ecosistemas. Sin embargo, faltan estudios que documenten estos cambios temporales. En este trabajo se ha abordado el análisis de la severidad de los incendios forestales ocurridos en la comunidad autónoma de Aragón (España) entre 1975 y 2020. Para ello, se ha creado una base de datos de severidad del índice delta *Normalized Difference Vegetation* Index (dNDVI) mediante la combinación de imágenes de los sensores Landsat-MSS/TM/ETM+/OLI, previa intercalibración de las imágenes MSS con las de los restantes sensores mediante un modelo de regresión lineal (R^2 = 0.88) elaborado a partir de los años de registro simultáneo de ambos sensores. En base a ella, se han analizado con el estadístico de Mann-Kendall las tendencias de los valores del primer, segundo y tercer cuartil (Q1, Q2 y Q3) del dNDVI, calculados para todos los incendios (n=116) y promediados anualmente. Los resultados indican una ausencia de tendencia clara en los valores de severidad. Las pendientes son positivas de forma consistente para el segundo y tercer cuartil, pero la tendencia sólo es significativa para este último a partir del año 2015, y su magnitud es baja (pendiente Sen < 2). Si se excluyen del análisis los años proporcionados por los sensores MSS (i.e. 1975-1984), no existen tendencias significativas para ningún cuartil, independiente del año de finalización de la serie, aunque se observan pendientes positivas para el periodo posterior al año 2010.

Palabras-clave: teledetección, efectos del fuego, dNDVI, Landsat MSS/TM/ETM+/OLI.

1. INTRODUCCIÓN

El fuego es un proceso natural que ha modelado la superficie terrestre, siendo un factor clave en la distribución y composición de la mayoría de los biomas del mundo (Bond et al., 2005) y un elemento con el que el ser humano ha convivido a lo largo de toda su historia (Scott, 2000). En el actual contexto de cambio global, son numerosas las investigaciones que analizan las tendencias de las principales variables que configuran el regimen del fuego (i.e. densidad, frecuencia, intensidad, estacionalidad, tamaño, distribución, superficie quemada, severidad) para determinar sus trayectorias y el previsible comportamiento de este fenómeno bajo diferentes escenarios (Flannigan et al., 2009). La percepción a nivel global es de una intensificación de todas las variables asociadas al fuego (North et al., 2015). Sin embargo, los datos disponibles no avalan estas tendencias generales (Doerr y Santín, 2016).

Los trabajos existentes, además, se enfocan en su mayoría en el estudio de las tendencias del número de incendios y de la superficie quemada (Moriondo et al., 2006; Mouillot et al., 2002). Estas variables, aunque importantes, no siempre son el mejor indicador para medir los efectos del fuego. De hecho, desde la perspectiva de la ecología del fuego, se considera que la severidad (i.e. impacto del fuego sobre el ecosistema) y su distribución espacial es más determinante para establecer el tiempo de recuperación (Doerr y Santín, 2016; Parks y Abatzoglou, 2020). En este sentido, la alta severidad se vincula con tasas de erosión más elevadas (Moody et al., 2013) y menores tasas de recuperación vegetal, con posibles procesos de cambio en la estructura forestal (i.e. conversión de bosques a áreas de matorral) (Walker et al., 2018).

La idea de que la intensidad y la severidad del fuego están aumentado está presente en la literatura científica (North et al., 2015; Stephens et al., 2013). Sin embargo, los estudios que han examinado explícitamente las tendencias de la severidad son escasos, poco representativos espacialmente (i.e. muy enfocados

en la costa oeste de Estados Unidos y Canadá) y presentan resultados contrarios (Guindon et al., 2021; Singleton et al., 2019) o dependientes de las formaciones vegetales o ecorregiones analizadas (Miller et al., 2012; Picotte et al., 2016). Se precisa, por tanto, del desarrollo de más estudios y de aproximaciones regionales (Doerr y Santín, 2016; S. A. Parks y Abatzoglou, 2020).

En la Europa mediterránea los incendios son uno de los principales agentes de perturbación ambiental. Se trata, además, de un espacio con un régimen de fuego profundamente degradado y antropizado (Shlisky et al., 2007). Las tendencias observadas son descendentes en el número de incendios y en la superficie quemada, como resultado de las políticas de exclusión del fuego implementadas desde mediados de la década de los 90 (Rodrigues et al., 2020; San-Miguel-Ayanz et al., 2013) y, según estudios prospectivos recientes (Jiménez-Ruano et al., 2020), se espera que continúen esa trayectoria. No obstante, un importante número de expertos y gestores alerta acerca de las consecuencias imprevistas de esta política de exclusión total, la llamada "paradoja del fuego". La gran acumulación de combustible, unida a unas previsiones climáticas más peligrosas, puede conducir a un incremento en la frecuencia de los grandes incendios (i.e. "megafuegos") y en su severidad (San-Miguel-Ayanz et al., 2013).

En un ecosistema que ha sido modelado por el fuego y que está adaptado a él, ligeros aumentos en la frecuencia o en la superficie quemada pueden ser incluso positivos ecológicamente (Pausas y Vallejo, 1999). Sin embargo, el aumento de la frecuencia de los grandes incendios, especialmente si éstos superan los umbrales de severidad que comprometen el mantenimiento de sus funciones ecosistémicas, puede amenazar la resiliencia de este ecosistema. Resulta, por tanto, fundamental, identificar los cambios en la severidad para conocer las verdaderas implicaciones de la transformación del régimen del fuego en este ecosistema y desarrollar políticas adecuadas para asegurar su conservación y sostenibilidad.

En esta contribución, se presentan resultados de una evaluación de las tendencias de la severidad de los incendios en Aragón (España) en base a dos objetivos. El primero es la creación de una base de datos de severidad de los incendios desde 1975 hasta 2020 a partir de las imágenes de satélite capturadas por todos los sensores del satélite Landsat (MSS a OLI). El segundo objetivo es caracterizar la severidad a escala regional y determinar si existe alguna tendencia en la severidad de los incendios en el periodo 1975-2020.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El objeto de estudio en este trabajo son los incendios forestales ocurridos en la Comunidad Autónoma de Aragón desde 1975 hasta 2020 (Figura 1). La base de datos de partida, facilitada por el Servicio de Planificación y Gestión Forestal del Gobierno de Aragón, proporciona un censo de todos los incendios superiores a 100 has ocurridos en el territorio aragonés, un total de 172 incendios que suponen unas 180.000 has quemadas totales en este periodo de 45 años. Como muestra la cartografía de la Figura 1, las áreas quemadas se distribuyen en las tres provincias del siguiente modo: 45% en Zaragoza, 37% en Huesca y 18% en Teruel.

Para este estudio, la base de datos se ha limitado a los incendios ocurridos en verano (meses de junio a septiembre, ambos inclusive), dado el dominio de esta tipología en el conjunto de la base de datos (88% del total) y a que en esta estación el análisis de la información de satélite es más consistente al minimizarse las sombras topográficas, los problemas de la geometría de iluminación y la variabilidad fenológica. Se consideraron además sólo aquellos que afectaron a una superficie forestal superior a 100 has. Para ello, se modificaron los perímetros de los incendios a los límites de la superficie forestal proporcionados por la cartografía del Corine Land Cover de 1990. Por último, para evitar sesgo en las interpretaciones se excluyeron los incendios con una recurrencia inferior a 10 años y se eliminaron también los años con un único incendio de reducidas dimensiones, menos de 1000 píxeles (Guindon et al., 2021). En base a estos criterios, la serie temporal establecida finalmente para el análisis de la severidad se compone de un total de 116 incendios, con una superficie forestal total afectada de aproximadamente 134.000 has (35% bosques de coníferas y frondosas y 65% de áreas de matorral, pastizal y espacios con vegetación escasa), ocurridos en 28 años, con 1975 y 2019 como los años que marcan el inicio y el final de la serie (Figura 2).

Los datos del número de incendios y la superficie forestal quemada (Figura 2) reflejan una alta variabilidad interanual, con años como 1994 o 2009, en los que un elevado número de incendios genera una alta superficie quemada, y otros como 1980 o 1991, en los que son pocos grandes incendios los responsables del área quemada. Se observa una tendencia descendente en ambas variables, con máximos en el número de incendios en la década de 1980 y máximos en la superficie forestal afectada en la década de 1990.

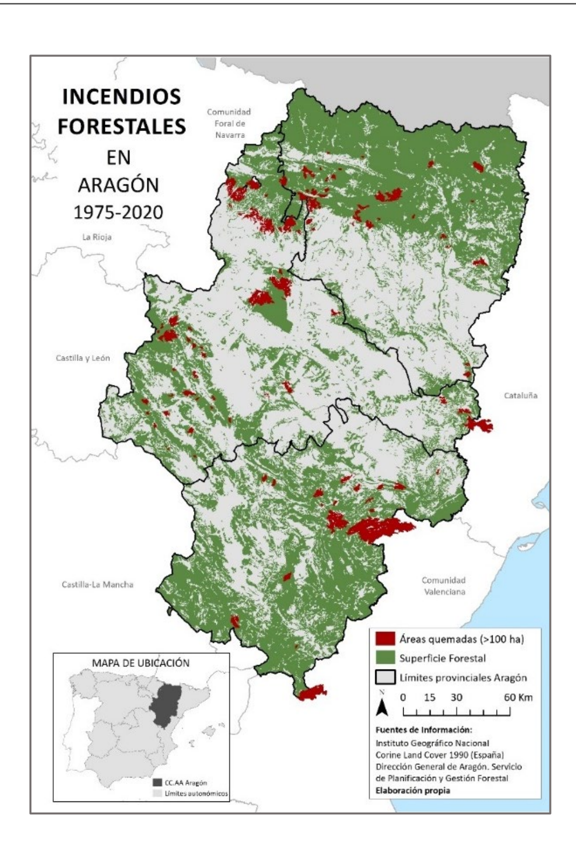


Figura 1. Distribución espacial de las áreas quemadas en Aragón (1975-2020).

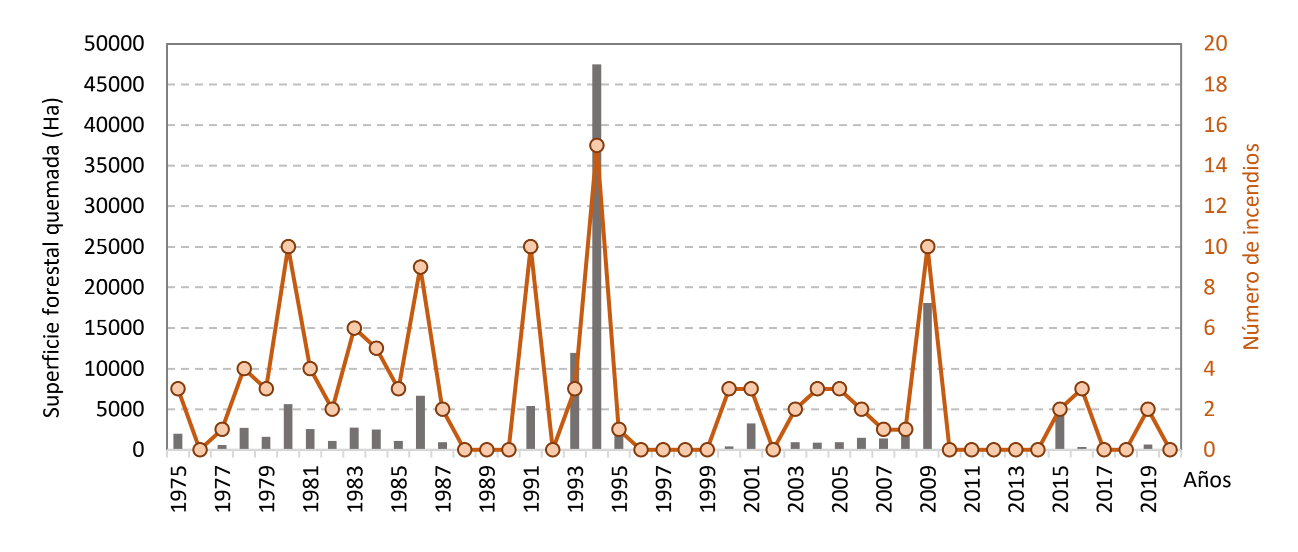


Figura 2. Serie temporal de incendios forestales en Aragón (1975-2020).

3. METODOLOGÍA

3.1. Creación de la base de datos de severidad

Determinar si existe o no alteración en los regímenes del fuego requiere de estudios de teledetección a largo plazo (Singleton et al., 2019). En este trabajo, con objeto de elaborar la serie histórica más amplia posible, se ha hecho uso del satélite Landsat combinando la información proporcionada por los sensores MSS 1-5, TM 4-5, ETM+ 7 y OLI-8 (Tabla 1). Experiencias en esta línea pueden encontrarse en otros trabajos de temática ambiental como los de (Röder et al., 2001; Zhao et al., 2022).

Para asegurar la continuidad y la homogeneidad de la serie temporal, los datos de severidad se derivaron utilizando la metodología de la diferencia del *Normalized Difference Vegetation Index* (en adelante dNDVI) (Chafer et al., 2004), con experiencias previas en su aplicación a incendios forestales (Hammill y

Bradstock, 2006; Ndalila et al., 2018).

$$dNDVI = (NDVI_{pre} - NDVI_{post}) * 1000 \quad (1)$$

donde $NDVI = (infrarrojo\ cercano - rojo\ )/\ (infrarrojo\ cercano\ + rojo)$

Tabla 1. Características de los sensores del satélite Landsat.

Característica	*Sensores MSS 1-5*	*Sensores TM 4-5, ETM+ 7, OLI-8*
Resolución espacial	60 m	30 m
Bandas ópticas	4 bandas: verde, rojo, red-edge, infrarrojo cercano	6 bandas: azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio de onda corta 1 y 2
Nivel de procesamiento	Reflectividad al techo de la atmósfera (TOA)	Reflectividad de superficie (SR)
Disponibilidad	1975-1992	1985-actualidad

Para todos los sensores, las imágenes pre- y post-fuego fueron obtenidas a partir de la mediana de las imágenes de verano de los años anterior y posterior al incendio, respectivamente. El límite de un año antes asegura que ninguna otra perturbación interfiere con la señal del fuego. La utilización del primer verano después de cada incendio, en lugar de las imágenes de ese mismo año, implica que los efectos del fuego analizados incluyen no sólo los efectos inmediatos sino también la respuesta del ecosistema en términos de mortalidad o de recuperación durante el primer año después del fuego (Key y Benson, 2006). Se trata de una perspectiva de evaluación extendida que es la aplicada de forma generalizada en los estudios de tendencias de severidad (Guindon et al., 2021; Miller et al., 2012; Miller y Safford, 2012).

Los valores de severidad fueron calculados a una resolución espacial de 60m (la más restrictiva de la serie histórica, Tabla 1) y exportados con un nivel de procesamiento diferente según el sensor: reflectividad en el techo de la atmósfera (*top of atmosphere, TOA*) para las imágenes de los sensores MSS y reflectividad de superficie (*surface reflectance, SR*) para los sensores TM a OLI. En ambos casos se aplicaron máscaras para eliminar del cálculo de las medianas los píxeles afectados por la presencia de nubes o sombras de nubes.

El procesamiento de todas las imágenes se realizó en la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017), utilizando para el cálculo del índice dNDVI una adaptación del código proporcionado por Parks et al. (2018). Para el procesamiento específico de las imágenes de los sensores MSS, no incluidas en la misma cadena de procesamiento que el resto de los sensores, se utilizó la librería "msslib".

La calibración entre las dos colecciones se realizó utilizando los años comunes a los dos conjuntos de datos: 1985, 1986 y 1987. Los incendios de los años 1988 a 1991 no pudieron utilizarse para la intercalibración por la existencia de problemas de bandeado en las imágenes. Los valores de dNDVI-TOA de los sensores MSS y dNDVI-SR de los sensores TM/ETM+/OLI fueron comparados mediante un análisis de regresión lineal para obtener las ecuaciones de transformación con las que extender la serie temporal de valores Landsat-SR desde 1985 hasta 1975. Para minimizar el efecto de la autocorrelación espacial, los análisis estadísticos se aplicaron sobre una selección aleatoria de 400 píxeles por incendio (1/3 de la muestra del año con menor número de píxeles). Para asegurar la estabilidad del modelo de regresión obtenido, se aplicaron los análisis a cada uno de los años de manera independiente y a la base de datos global, y sobre tres selecciones aleatorias de píxeles. Los estadísticos de coeficiente de determinación (R^2) y error cuadrático medio (RMSE) se utilizaron para evaluar la calidad de los modelos obtenidos.

3.2. Análisis de tendencias en la severidad de los incendios

Para abordar el segundo objetivo de caracterizar la severidad de los incendios y su tendencia, se describió primero cada incendio utilizando tres valores: el primer cuartil (Q1), la mediana (Q2) y el tercer cuartil (Q3) de los valores de dNDVI, siguiendo la metodología de Guindon et al. (2021). Los valores de los incendios del mismo año se agregaron mediante el cálculo de promedios anuales. Para evitar de nuevo los problemas de autocorrelación espacial, estos cálculos se aplicaron sobre una selección aleatoria de píxeles (n = 300, 1/3 de los píxeles del año con menor número de píxeles quemados).

Con estos valores se realizaron las pruebas de tendencia de Mann-Kendall, utilizando el umbral $p \leq 0,05$ para la significación estadística y la pendiente Sen y su intervalo de confianza para valorar la magnitud de la tendencia y so confiabilidad. Para comprobar si la significación de los modelos es dependiente del año de

finalización de la serie temporal, se desarrollaron modelos separados para la serie temporal finalizando en el año 2005 (e.g., 1975-2019, 1975-2016… y 1975-2005). Del mismo modo, se comprobó la influencia en la significación de las tendencias del punto de inicio de la serie temporal en 1975 o 1985, momento en el que se inicia la disponibilidad de la serie Landsat TM/ETM+/OLI.

4. RESULTADOS

4.1. Intercalibración de las colecciones MSS y TM/ETM+/OLI

La comparativa entre los valores de dNDVI-TOA y dNDVI-SR (Tabla 2 y Figura 3) para los incendios ocurridos en los años 1985-87 refleja un claro sesgo hacia valores más elevados en la colección SR, como resultado de los procesos de corrección atmósfera aplicados en el cálculo de los valores de reflectividad de superficie. Las diferencias son mínimas en el año 1986 y máximas en 1987, con un valor de sesgo promedio de -33,7 puntos y un RMSE de 54,2 puntos. La distribución espacial de los valores de dNDVI no presenta diferencias entre ambas colecciones, lo que revela la correspondencia de ambas informaciones (Figura 3).

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los valores de dDNVI en las dos colecciones de imágenes. Donde TOA es la reflectividad en el techo de la atmósfera para la colección MSS; SR es la reflectividad de superficie para los sensores TM/ETM+/OLI y RMSE, es el error cuadrático medio.

	1985		*1986*		*1987*		*1985-1987*	
Característica	*TOA*	*SR*	*TOA*	*SR*	*TOA*	*SR*	*TOA*	*SR*
Mínimo	-74,34	-96,12	-157,29	-83,97	-284,99	-213,84	-284,98	-213,84
Máximo	339,60	380,37	397,77	506,41	332,43	395,75	397,77	506,41
Media	122,94	157,93	150,34	181,21	73,61	125,62	138,55	172,24
RMSE	50,09		52,61		67,94		54,19	
Sesgo	-34,99		-30,87		-52,012		-33,69	

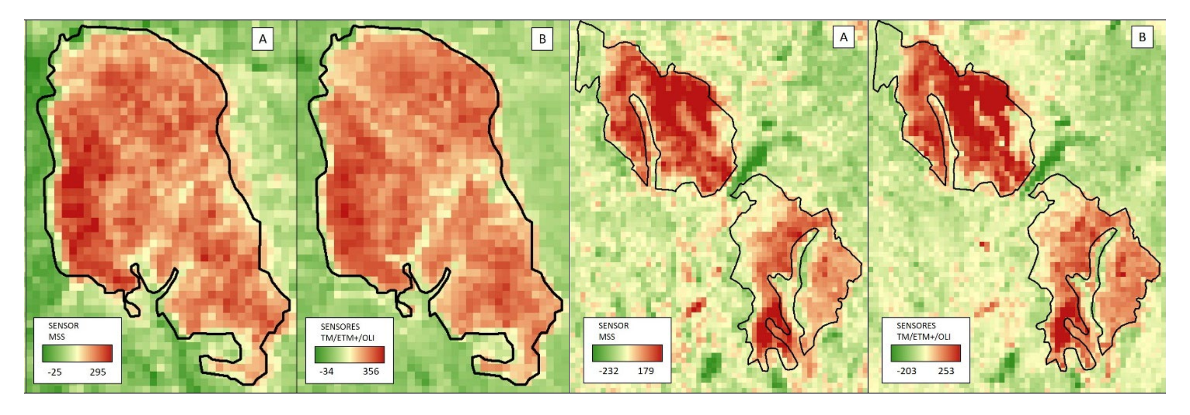


Figura 3. Distribución espacial de los valores de dNDVI en los incendios de Zuera (izquierda) y Luna (derecha) de 1986 y 1987, respectivamente. En ambos incendios se muestran en el sector A los valores de dNDVI-TOA del sensor MSS y en el sector B los valores de dNDVI-SR del sensor TM.

Los resultados obtenidos en los análisis de regresión aplicados a los tres muestreos aleatorios de 400 píxeles por año revelaron la ausencia de influencia de la muestra seleccionada, por lo que se presentan solo los resultados de uno de los muestreos (Figura 4). Como se observa en la figura, los modelos obtenidos para cada año de manera independiente reflejan un buen acuerdo, con valores de $R^2 \geq 0,8$. En todos los casos los valores de intersección son muy próximos a 1 y los valores de pendiente oscilan entre los 25 y los 50 puntos de incremento del dNDVI-SR por cada incremento del dNDVI-TOA. El modelo global obtenido para el conjunto de los píxeles quemados de los tres años sitúa este valor de incremento en 38 puntos y ofrece un valor de ajuste cercano al 90%. Este modelo global, integrador de las relaciones entre ambas colecciones en los años objeto de comparación, fue el finalmente aplicado a los años 1975-1984 para extender los valores de dNDVI-SR a los primeros 10 años de la serie temporal.

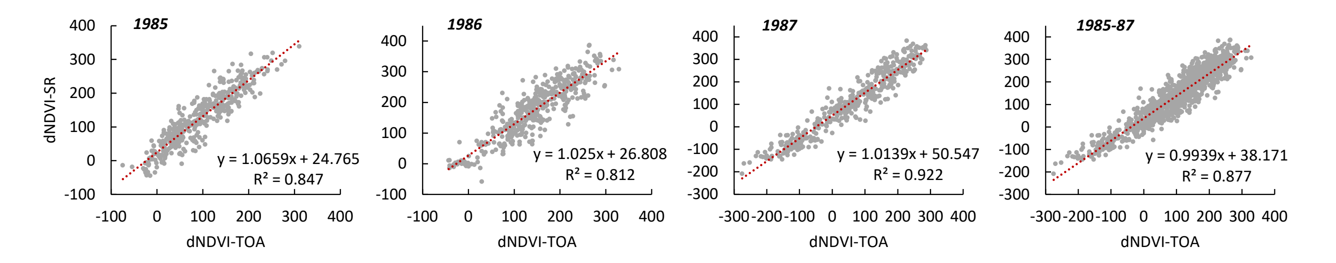


Figura 4. Gráficos de dispersión entre los valores de dNDVI-TOA y dNDVI-SR con indicación de las ecuaciones de regresión lineal desarrolladas para los años 1985, 1986 y 1987 y para el modelo global del periodo 1985 a 1987.

4.2. Tendencias de la severidad

La severidad de los incendios se distribuye en un amplio rango de valores de dNDVI en cada uno de los años analizados en la serie (Figura 5). Se observan así valores mínimos negativos, que indican un proceso de recuperación vegetal que supera a la situación previa al fuego, y valores máximos que se sitúan en la mayoría de los años por encima de los 300 puntos de dNDVI y con mucha frecuencia por encima del umbral de 400, lo que según algunas clasificaciones de este índice se correspondería con niveles de alta severidad (Hammill y Bradstock, 2006; Ndalila et al., 2018). Los valores promedio anuales, entre 100 y 300 puntos, indican una severidad media-baja en esta perspectiva extendida de evaluación de la severidad.

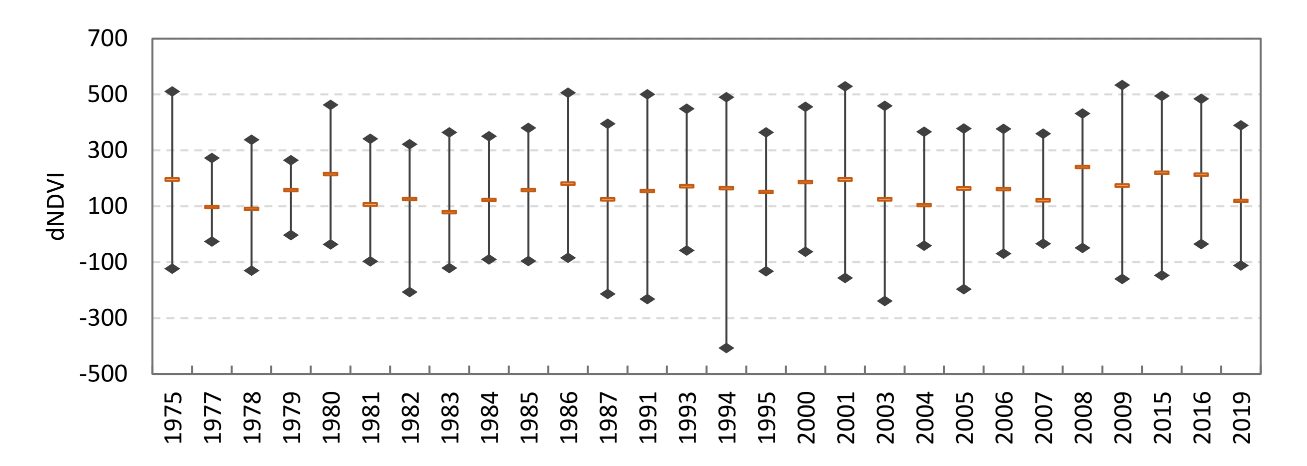


Figura 5. Valores de severidad anuales de dNDVI. Se representan los valores máximos, mínimos y promedios anuales.

Los valores de los estadísticos dNDVI-Q1, dNDVI-Q2 y dNDVI-Q3 presentan una alta varianza en la serie temporal (Figura 6). Los modelos de regresión Mann-Kendall para el cuartil Q3 (Figura 6 abajo) presentan una tendencia positiva, creciente, para todos los años analizados, que sin embargo sólo es significativa ($p \leq 0,05$) para las series que finalizan en los tres últimos años (i.e. 2015, 2016 y 2019). A pesar de que el estadístico detecta la existencia de tendencias, éstas son de poca magnitud (valor promedio de Sen de 1,9 puntos) y con intervalos de confianza muy amplios que disminuyen la confiabilidad de la tendencia. El análisis para los cuartiles Q1 y Q2 resultó en modelos no significativos para todos los años estudiados (Figura 6 arriba y centro). En el caso del Q2 las tendencias, aunque no significativas, mantienen una consistencia ascendente con incrementos muy leves, por debajo de 1 en valores de la pendiente Sen. En el Q1 el sentido de la tendencia no es claro, mostrando pendientes decrecientes cuando el año de finalización se la serie se retrasa más allá de 2008.

Situar el año 1985 como punto de inicio de la serie temporal (Figura 6, líneas naranjas) modifica el sentido de las tendencias, especialmente en los cuartiles Q2 y Q3, en los que aparecen tendencias descendentes cuando la finalización de la serie temporal es previa al año 2010. Supone, además, la pérdida de significación de las tendencias observadas en el Q3.

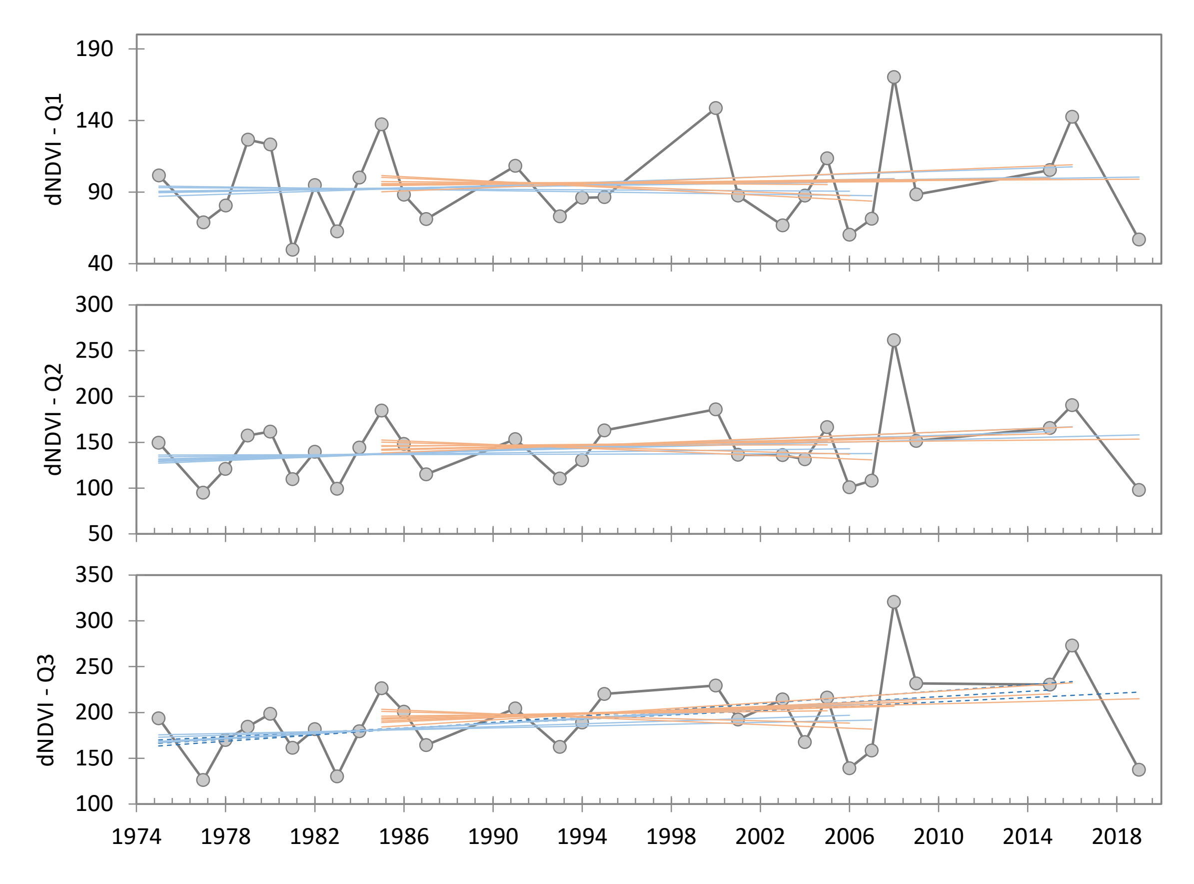


Figura 6. Tendencia de los valores promedio anuales del primer -Q1- (arriba), segundo -Q2- (centro) y tercer -Q3- (abajo) cuartil del dNDVI. Las líneas marcan las tendencias lineales. El color marca el origen de la serie en 1975, en azul, o en 1985, en naranja. El trazo discontinuo marca la significación estadística (p≤0,05).

5. DISCUSIÓN

Los resultados de este trabajo muestran tendencias positivas de los valores de alta severidad (i.e. dNDVI-Q3) en el intervalo 1975-2019, que responden a lo observado en otros estudios aplicando metodologías similares en diferentes regiones del oeste de Estados Unidos (Parks y Abatzoglou, 2020; Singleton et al., 2019). De manera similar al trabajo de Miller y Safford (2012), se observa una fuerte influencia de los últimos años de la serie temporal en la significación estadística de las tendencias. Concretamente, sólo son significativas las series que finalizan a partir del año 2015, aunque no puede establecerse un límite temporal claro dada la ausencia de incendios forestales en la serie en el quinquenio 2010-2014. No se han encontrado tendencias significativas para los valores de dNDVI de los cuartiles Q1 y Q2 representativos de la severidad baja y media respectivamente, aunque sí pendientes positivas de manera consistente especialmente en el Q2.

Es posible, dada la consistencia de las líneas de tendencia no significativas, que la no significación de las tendencias pueda deberse a la dispersión en el muestreo temporal de los datos, con importantes vacíos a finales de la década de 1980, en la segunda mitad de 1990 y en gran parte de la década de 2010, con sólo tres años con registro de incendios. La bibliografía informa también de algunas dificultades del estadístico no paramétrico de Mann-Kendall para testear tendencias lineales en series temporales no muy extensas y con una alta varianza, como la mostrada en nuestros datos de severidad (Yue et al., 2002). La utilización del índice de severidad dNDVI relativo (RdNDVI), que compensa las diferencias en las condiciones de la vegetación pre-fuego (Miller y Thode, 2007), permitiría incorporar a la serie temporal los incendios recurrentes e invernales excluidos del actual análisis, lo que haría aumentar la serie en 30 incendios y 10 años más de registro, que supondrían una mejora sustancial especialmente para los últimos diez años de la serie. Asimismo, la utilización de otros métodos estadísticos como los modelos ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*), aplicados con éxito en trabajos como los de Miller y Safford (2012) o Singleton et al. (2019) podrían mejorar la estimación de las tendencias lineales.

Un aspecto destacado de este estudio es la utilización de las imágenes Landsat-MSS para extender la serie temporal e iniciarla en el año 1975. En el caso de Aragón esta ampliación ha permitido incorporar al

análisis 9 incendios y más de 20.000 has forestales quemadas. La selección del índice de severidad ha sido la principal implicación metodológica de la inclusión de estos sensores. Frente al dNBR (delta *Normalized Burn Ratio,* (Key y Benson, 2006)), el índice globalmente aplicado en todos los estudios sobre tendencias de severidad (e.g. Miller et al. (2012); Singleton et al. (2019)), este trabajo se ha basado en el dNDVI al no disponer de la información espectral del infrarrojo medio de onda corta utilizada en la formulación del dNBR. Los efectos estudiados por este índice están principalmente asociados a la mortalidad de la vegetación y no tanto a aspectos como la producción de ceniza o sus efectos en el suelo (Miller y Thode, 2007), a los que es más sensible el dNBR. Del mismo modo, no se han podido utilizar umbrales de severidad al no disponer este índice de intervalos globalmente aplicados o de calibraciones con el índice de campo CBI (*Composite Burn Index,* (Key y Benson, 2006)), como sí ocurre con el dNBR. Frente a esta limitación, la incorporación de estos años se ha demostrado crucial en el caso de Aragón para el estudio de las tendencias. Retrasar el inicio de los análisis a 1985 se ha traducido en una menor consistencia de las tendencias positivas para todos los cuartiles, especialmente para los años anteriores a 2010, y en la pérdida de la significación estadística.

La aproximación para intercalibrar abordada en este estudio se basa en la utilización de las imágenes Landsat-TM SR como referencias calibradas con las que transformar, mediante ecuaciones de regresión lineal, las imágenes Landsat-MSS TOA. Esta aproximación se sustenta en la adquisición simultánea de imágenes que realizaban las plataformas Landsat-4 y -5, con ambos sensores alojados (Röder et al., 2001). No obstante, dadas las limitaciones existentes en esta intercalibración directa (i.e. diferente resolución espacial, diferente rango de las bandas espectrales y diferente resolución radiométrica), se considera necesario profundizar en la intercalibración entre las colecciones de imágenes Landsat-MSS y -TM abordando el análisis desde las relaciones entre bandas espectrales, no entre índices derivados, y mediante la selección de píxeles invariantes (Röder et al., 2001; Zhao et al., 2022).

Tan importante cono conocer la tendencia general de la severidad de los incendios en un ecosistema, es analizar las diferencias por comunidades vegetales. De hecho, como revelan trabajos previos en esta línea (Miller y Safford, 2012; Singleton et al., 2019) es previsible que se observen comportamientos contrastados. Se plantea, por tanto, profundizar el presente estudio evaluando las tendencias temporales dentro de bosques específicos y tipos de matorral para comprender cómo están cambiando los patrones del fuego en formaciones vegetales individuales.

Estudios como el presente, en el que se documentan las tendencias en la severidad de los incendios, son un primer paso para comprender los regímenes del fuego actuales y ayudar a predecir futuras transformaciones. Además, permiten identificar los ecosistemas y formaciones que están experimentando realmente alteraciones en su comportamiento y que, por tanto, son más vulnerables a estas características sin precedentes. Se contribuye, por tanto, a los objetivos de sostenibilidad de la Agenda 2030 proporcionando información crítica para la gestión sostenible y conservación de los bosques (ODS 15 – "Vida de los ecosistemas terrestres"), fortaleciendo su resiliencia y su capacidad de adaptación al cambio climático (ODS 13 – "Acción por el clima").

6. CONCLUSIONES

La disponibilidad de imágenes de satélite desde la década de 1970 proporciona un recurso muy valioso para mejorar el conocimiento de los cambios en el comportamiento de los incendios forestales. Mediante la intercalibración de las imágenes Landsat-MSS y -TM en los años 1985-87 se ha generado una ecuación (R^2 = 0,88) que ha permitido extender los valores del índice de severidad dNDVI hasta el año 1975.

El análisis de esta serie histórica no muestra una tendencia clara de incremento de la severidad de los incendios en las áreas forestales de Aragón. Se observan pendientes positivas consistentes en el segundo y tercer cuartil (Q2 y Q3) de los valores de dNDVI, pero las tendencias sólo son significativas para el Q3 cuando el año de finalización de la serie es posterior a 2015. Las tendencias son, además, de escasa magnitud (menos de 2 puntos de incremento). Si el inicio de la serie temporal se retrasa al año 1985 (comienzo de las colecciones de imágenes Landsat-TM) las trayectorias positivas, siempre no significativas, se limitan a los tres últimos de la serie (i.e. 2015, 2016 y 2019), observándose pendientes negativas con anterioridad a esas fechas.

Los resultados de este estudio no avalan, para el espacio analizado, la tesis de un incremento significativo de los niveles de severidad. No obstante, análisis más específicos a nivel de formación vegetal pueden proporcionar conocimiento adicional acerca del comportamiento de esta variable en los últimos 45 años. Además, dadas las profundas implicaciones que tiene para los ecosistemas forestales un incremento de la severidad, se considera necesario reforzar los resultados obtenidos mediante la exploración de otros métodos y aproximaciones para la intercalibración de las colecciones de imágenes y el análisis de tendencias.

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación se ha realizado en el contexto del proyecto de I+D+i Retos Investigación: PID2020-118886RB-I00 "Análisis dinámico de la Resiliencia de los Paisajes Forestales afectados por el fuego (PaF) mediante indicadores espectrales multisensor", financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación / Agencia Estatal de Investigación (10.13039/501100011033).

7. BIBLIOGRAFÍA

Bond, W. J., Woodward, F. I., y Midgley, G. F. (2005). The global distribution of ecosystems in a world without fire. New Phytologist, 165(2), 525–538. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01252.x

Chafer, C. J., Noonan, M., y Macnaught, E. (2004). The post-fire measurement of fire severity and intensity in the Christmas 2001 Sydney wildfires. International Journal of Wildland Fire, 13(2), 227–240. https://doi.org/doi:10.1071/WF03041

Doerr, S. H., y Santín, C. (2016). Global trends in wildfire and its impacts: perceptions versus realities in a changing world. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 371(1696), 20150345. https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0345

Flannigan, M. D., Krawchuk, M. A., de Groot, W. J., Wotton, B. M., y Gowman, L. M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. International Journal of Wildland Fire, 18(5), 483. https://doi.org/10.1071/WF08187

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., y Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2017.06.031

Guindon, L., Gauthier, S., Manka, F., Parisien, M.-A., Whitman, E., Bernier, P., Beaudoin, A., Villemaire, P., y Skakun, R. (2021). Trends in wildfire burn severity across Canada, 1985 to 2015. Canadian Journal of Forest Research, 51(9), 1230–1244. https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0353

Hammill, K. A., y Bradstock, R. A. (2006). Remote sensing of fire severity in the Blue Mountains: influence of vegetation type and inferring fire intensity. International Journal of Wildland Fire, 15(2), 213–226. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1071/WF05051

Jiménez-Ruano, A., de la Riva Fernández, J., y Rodrigues, M. (2020). Fire regime dynamics in mainland Spain. Part 2: A near-future prospective of fire activity. Science of The Total Environment, 705, 135842. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.135842

Key, C. H., y Benson, N. C. (2006). Landscape Assessment (LA). In D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, C. H. Key, N. C. Benson, S. Sutherland, y L. J. Gangi (Eds.), FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/24066

Miller, J. D., y Safford, H. (2012). Trends in wildfire severity: 1984 to 2010 in the Sierra Nevada, Modoc Plateau, and southern Cascades, California, USA. Fire Ecology, 8(3), 41–57. https://doi.org/10.4996/FIREECOLOGY.0803041

Miller, J. D., Skinner, C. N., Safford, H. D., Knapp, E. E., y Ramirez, C. M. (2012). Trends and causes of severity, size, and number of fires in northwestern California, USA. Ecological Applications, 22(1), 184–203. https://doi.org/10.1890/10-2108.1

Miller, J. D., y Thode, A. E. (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). Remote Sensing of Environment, 109(1), 66–80. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006

Moody, J. A., Shakesby, R. A., Robichaud, P. R., Cannon, S. H., y Martin, D. A. (2013). Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. Earth-Science Reviews, 122(0), 10–37. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.03.004

Moriondo, M., Good, P., Durao, R., Bindi, M., Giannakopoulos, C., y Corte-Real, J. (2006). Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. Climate Research, 31, 85–95.

Mouillot, F., Rambal, S., y Joffre, R. (2002). Simulating climate change impacts on fire frequency and vegetation dynamics in a Mediterranean-type ecosystem. Global Change Biology, 8(5), 423–437. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00494.x

Ndalila, M. N., Williamson, G. J., y Bowman, D. M. J. S. (2018). Geographic Patterns of Fire Severity Following an Extreme Eucalyptus Forest Fire in Southern Australia: 2013 Forcett-Dunalley Fire. Fire, 1(3), 40. https://doi.org/10.3390/fire1030040

North, M. P., Stephens, S. L., Collins, B. M., Agee, J. K., Aplet, G., Franklin, J. F., y Fulé, P. Z. (2015). Reform forest fire management. Science, 349(6254), 1280–1281. https://doi.org/10.1126/science.aab2356

Parks, S. A., y Abatzoglou, J. T. (2020). Warmer and Drier Fire Seasons Contribute to Increases in Area Burned at High Severity in Western US Forests From 1985 to 2017. Geophysical Research Letters, 47(22). https://doi.org/10.1029/2020GL089858

Parks, S., Holsinger, L., Voss, M., Loehman, R., y Robinson, N. (2018). Mean Composite Fire Severity Metrics Computed with Google Earth Engine Offer Improved Accuracy and Expanded Mapping Potential. Remote Sensing, 10(6), 879. https://doi.org/10.3390/rs10060879

Pausas, J. G., y Vallejo, R. (1999). The role of fire in European Mediterranean Ecosystems. In E. Chuvieco (Ed.), Remote sensing of large wildfires in the European Mediterranean Basin (pp. 3–16). Springer-Verlag.

Picotte, J. J., Peterson, B., Meier, G., y Howard, S. M. (2016). 1984–2010 trends in fire burn severity and area for the conterminous US. International Journal of Wildland Fire, 25(4), 413. https://doi.org/10.1071/WF15039

Röder, A., Hill, J., y Hostert, P. (2001). Radiometric intercalibration of Landsat-TM and -MSS data for quantitative long-term environmental monitoring. Conference EARSeL 20th Symposium - Remote Sensing in the 21st Century.

Rodrigues, M., Jiménez-Ruano, A., y de la Riva, J. (2020). Fire regime dynamics in mainland Spain. Part 1: Drivers of change. Science of The Total Environment, 721, 135841. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.135841

San-Miguel-Ayanz, J., Moreno, J. M., y Camia, A. (2013). Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives. Forest Ecology and Management, 294, 11–22. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2012.10.050

Scott, A. C. (2000). The Pre-Quaternary history of fire. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 164(1–4), 281–329. https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00192-9

Shlisky, A., Waugh, J., González, P., González, M., Manta, M., Santoso, H., Alvarado, E., Ainuddin Nuruddin, A., Rodríguez-Trejo, D. A., Swaty, R., Schmidt, D., Kaufmann, M., Myers, R., Alencar, A., Kearns, F., Johnson, D., Smith, J., Zollner, D., y Fulks, W. (2007). El fuego, los ecosistemas y la gente: Amenazas y estrategias para la conservación global de la biodiversidad. Informe técnico de la Iniciativa Global para el Manejo del Fuego 2007-2. The Nature Conservancy.

Singleton, M. P., Thode, A. E., Sánchez Meador, A. J., y Iniguez, J. M. (2019). Increasing trends in high-severity fire in the southwestern USA from 1984 to 2015. Forest Ecology and Management, 433, 709–719. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.039

Stephens, S. L., Agee, J. K., Fulé, P. Z., North, M. P., Romme, W. H., Swetnam, T. W., y Turner, M. G. (2013). Managing Forests and Fire in Changing Climates. Science, 342(6154), 41–42. https://doi.org/10.1126/science.1240294

Walker, R. B., Coop, J. D., Parks, S. A., y Trader, L. (2018). Fire regimes approaching historic norms reduce wildfire-facilitated conversion from forest to non-forest. https://doi.org/10.1002/ecs2.2182

Yue, S., Pilon, P., y Cavadias, G. (2002). Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. Journal of Hydrology, 259(1–4), 254–271. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7

Zhao, C., Wu, Z., Qin, Q., y Ye, X. (2022). A Framework of Generating Land Surface Reflectance of China Early Landsat MSS Images by Visibility Data and Its Evaluation. 1802. https://doi.org/10.3390/rs14081802



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 78-86

Dinámicas de cambios de cobertura y usos de suelo de las ciudades y el hinterland de la macrozona sur de Chile: El caso de Temuco, Valdivia y Puerto Montt

M. Morales Soto[1], F. Maturana Miranda[2], S. Escolano Utrilla[1]

[1] *Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. Zaragoza. España.*
[2] *Instituto Ciencias de la Tierra, Universidad Austral de Chile. Valdivia. Chile.*

mtmorale@uc.cl, francisco.maturana@uach.cl, severino@unizar.es

RESUMEN: Los procesos de urbanización a nivel global se caracterizan por evidenciar diferentes formas de desarrollo, tales como la expansión continua del suelo urbano, la migración rural-urbana y procesos de reorganización social y económica, entre otros. Ante esta situación, la extensión de áreas urbanas en desmedro de áreas destinadas a actividades silvoagropecuarias son uno de los efectos más patentes ante los procesos de urbanización a nivel planetario. Para el caso particular de las ciudades de la macrozona sur de Chile, en los últimos 30 años, estas ciudades han experimentado fuertes cambios en las dinámicas de cambio de uso y cobertura de suelo, y esto como respuesta frente al avance de la vivienda privada en baja densidad hacia la periferia y los suburbanos. Con el desarrollo de metodologías cuantitativas basadas principalmente en herramientas SIG y teledetección han permitido estudiar y estimar las dinámicas pasadas, actuales y futuras de cambio de uso y cobertura de suelo, tanto a nivel local como global. El análisis basado en la metodología de Zonas Climáticas Locales (ZCL) permitió estimar que las ciudades de Puerto Montt, Temuco y Valdivia presentan altos grados de urbanización de mediana y baja densidad dentro del hinterland de la macrozona sur, aumentando en promedio 79,7% en el periodo 1988-2005 y aumentando a 99,5% en el periodo 2005-2020.

Palabras-clave: uso y cobertura de suelo, urbanización dispersa, SIG, Zonas Climáticas Locales.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de investigación

Los procesos de urbanización a nivel global se caracterizan por evidenciar diferentes formas de desarrollo, tales como la expansión continua del suelo urbano, la migración rural-urbana y procesos de reorganización social y económica, entre otros (Nel·lo, 2000; Peet, 1970). Por otro lado, la transformación morfológica de las ciudades se basa en las relaciones que existe entre lo urbano y lo rural, donde la perspectiva de la relación entre naturaleza y ciudad es algo que ha sido ampliamente estudiado para describir y analizar los problemas del urbanismo y degradación ambiental (siendo los cambios de usos y coberturas de suelo los más evidentes) basados en la idea de sustentabilidad.

A nivel global, cambios de uso y coberturas de suelo entre 1960 y 2019 han modificado el 17% de la superficie de la tierra, donde el 12% corresponden sólo a transiciones de un solo uso (por ejemplo, pasar de bosque a agrícola) y el 5% corresponde a múltiples mutaciones (climáticas y medioambientales) durante los últimos 59 años (Winkler et al., 2021). El concepto de uso de suelo posee diversas definiciones que dependen del contexto económico, político y ambiental en el que contextualiza. En esta línea, los efectos que ha tenido en Latinoamérica los cambios de uso y cobertura de suelo van desde el manejo del uso, contaminación y degradación de recursos hídricos (FAO, 2015), deforestación de bosque nativo basada en la sobreexplotación de suelo, artificialización excesiva de los cultivo y procesos de expansión urbana (Valenzuela, 1993).

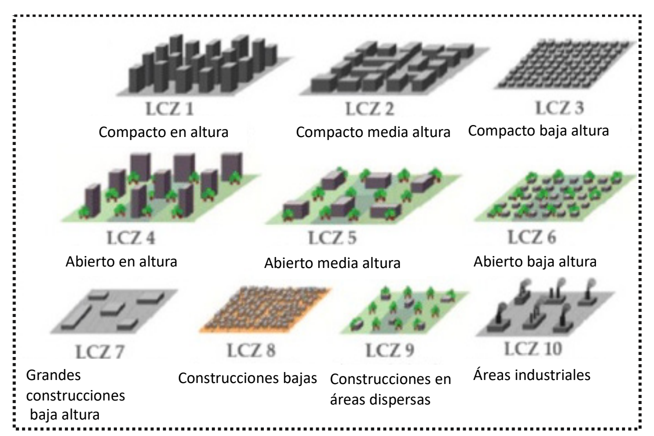
En el caso de Chile, ocurre una situación similar a lo de otros países de la región. Los procesos de parcelación en áreas rurales próximas a la ciudad formal han facilitado la proliferación de asentamientos

humanos de forma dispersa (Zunino e Hidalgo, 2009). Por ejemplo, los análisis de Maturana et al. (2021) para la conurbación de Temuco-Padre Las Casas evidencian que el desarrollo de nuevas áreas urbanas entre 1985-2017 se concentra y aproximan a zonas con alto valor ecológico y cultural establecidas por la legislación chilena actual, tales como Áreas de Desarrollo Indígena (Art. 26° de la Ley Nº 19.253/1995) y el Monumento Natural Cerro Ñielol (Decreto Supremo Nº 504/1939 del Ministerio de Tierras y Colonización). Para el caso particular de las ciudades de la macrozona sur de Chile, en los últimos 30 años, estas ciudades han experimentado fuertes cambios en las dinámicas de cambio de uso y cobertura de suelo, y esto como respuesta frente al avance de la vivienda privada en baja densidad hacia la periferia y los suburbanos.

¿Qué es una Zona Climática Local?

El desarrollo de metodologías cuantitativas basadas principalmente en herramientas SIG y teledetección han permitido estudiar y estimar las dinámicas pasadas, actuales y futuras de cambio de uso y cobertura de suelo, tanto a nivel local como global. En el año 2012, Stewart y Oke introducen el concepto de "Zonas Climáticas Locales" (ZCL) (de sus siglas en inglés LCZ) que tiene por finalidad definir regiones que poseen características similares desde el punto de vista de su coberturas y usos de suelo, materialidad, estructuras y actividades que desarrolla la población en un territorio. El modelo de ZCL clasifica áreas con base en la morfología urbana, la construcción y la cobertura superficial (permeable e impermeable). Estas se dividen en 17 clases estándar, 10 para construcciones (por ejemplo, zonas compactas de gran altura, compactas de poca altura, abiertos de poca altura, industria pesada) y 7 para vegetación (por ejemplo, árboles densos, árboles dispersos, suelo desnudo, agua) con diferentes condiciones microclimáticas en diferentes zonas asociadas con la temperatura del aire (Ver figura 1).

Una de las ventajas que posee este modelo es que permite el mapeo de usos y coberturas de suelo en base a características climáticas del medio construido (Stewart, 2011). El convencional método de mapeo de ZCL han sido ampliamente desarrollado por diversos estudios, donde destaca el método desarrollado por el Word Urban Dataset and Portal Tool (WUDAPT) (Bechtel et al., 2015). Este método trabaja con imágenes provenientes del satélite Landsat 8, pero en estudios realizados por Aslam y Rana (2022) destacan la utilización de otros sensores remotos, tales como Landsat 5 y 7, Sentinel 1, 2, imágenes MODIS, entre otros.



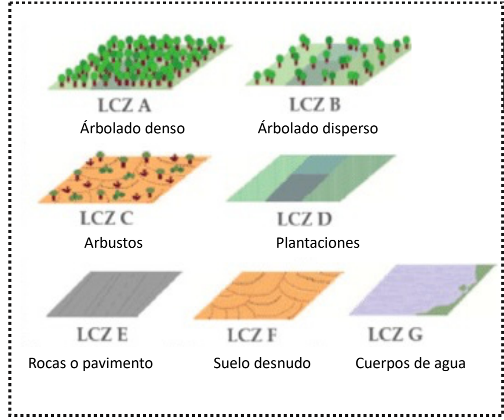


Figura 1. Esquema de Zonas Climáticas Locales (LCZ): Tipologías de construcción o pensadas en usos urbanos (1-10) y tipologías de coberturas de suelo (A-G) (Stewart y Oke, 2012).

1.2. Área de estudio

El presente trabajo se desarrolla para las ciudades y el hinterland de Temuco-Padre Las Casas (38°44'30.62"S - 72°36'1.91"O), Valdivia (39°49'2.56"S - 73°14'33.12"O) y Puerto Montt-Puerto Varas (41°28'8.08"S - 72°56'28.09"O). En cuanto a la ciudad de Temuco esta es considerada una de las principales áreas urbanas policomunales del sur de Chile, siendo el principal centro urbano de la Región de La Araucanía que se encuentra conurbado a la comuna de Padre Las Casas. A diferencia de varias ciudades intermedias chilenas, la ciudad de Valdivia (Región de Los Ríos) corresponde a un área mono-comunal, pero según el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2020) esta ciudad posee un hinterland que alcanza a los límites de las comunas de Paillaco y Mafil. Para el caso de la ciudad Puerto Montt (Región de Los Lagos) actualmente, y al igual que Temuco, se encuentra conurbada a la ciudad de Puerto Varas, y es considerada

la puerta de entrada hacia la Patagonia austral y económicamente es conocida por su importancia en la actividad salmonera y forestal (Bustos-Gallardo y Prieto, 2019) (Ver figura 2).

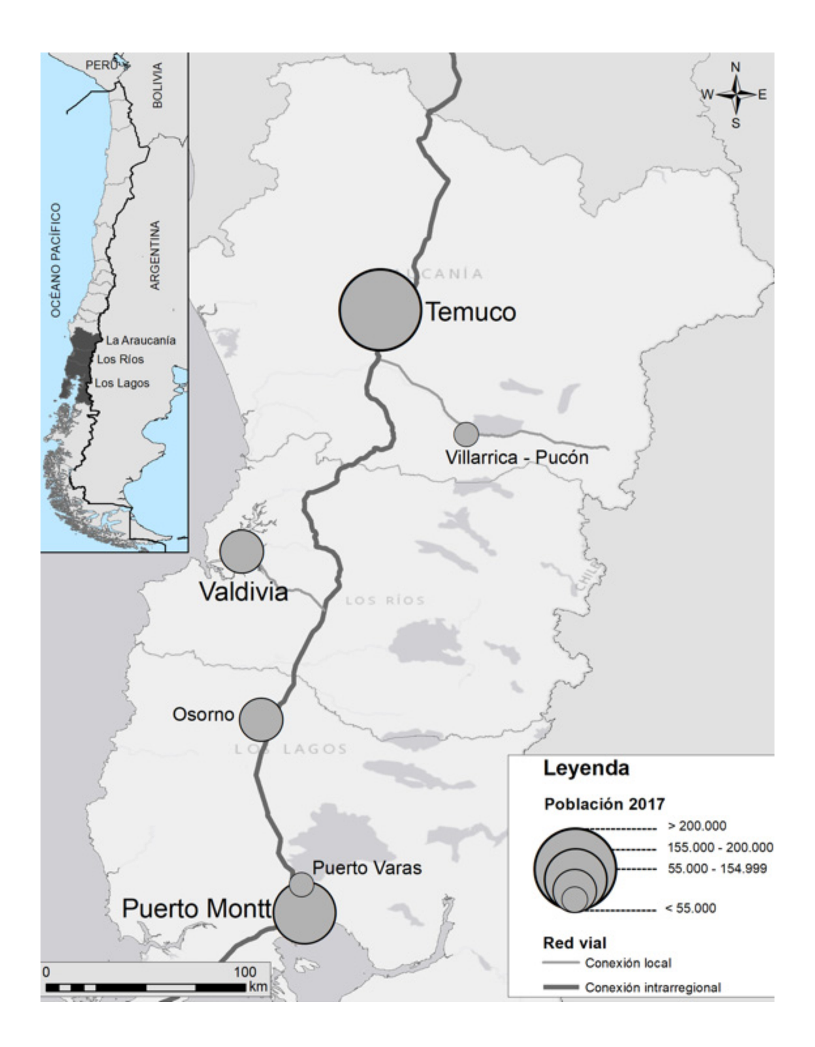


Figura 2. Mapa área de estudio.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo propone analizar y caracterizar las dinámicas de cambio de uso y cobertura de suelo entre 1988-2020 para las ciudades de Temuco, Valdivia y Puerto Montt. Para este objetivo se aplicó la metodología propuesta por Stewart y Oke (2012) para identificar Zonas Climáticas Locales (ZCL) (Ver figura 3). Primero, se procedió al análisis de clasificación supervisada de imágenes satelitales Landsat 4 Thematic Mapper (TM), Landsat 5 Thematic Mapper (TM), Landsat 7 (ETM+) y Landsat 8 (OLI). Estas imágenes fueron proporcionadas por el United States Geological Survey (USGS) (Ver tabla 1).

Para la identificación de coberturas y usos de suelo por medio de teledetección fue necesario el pre-procesamiento de imágenes, por medio de correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas (Pu, Landry, & Zhang, 2015). Para el caso de las imágenes Landsat 7 (ETM+) se utilizó la herramienta de libre acceso "Landsat Toolbox "dentro del programa ArcGIS 10.2 que fue desarrollada por el USGS para corregir el bandeado que presentan esas imágenes. Para las correcciones radiométricas y atmosféricamente se utilizó el método FLAASH (Kaufman et al., 1997), que están incluidos en el programa ENVI© (ENVI, 2009).

Posteriormente, se aplicó la metodología de zonas climáticas locales (ZCL) propuestas por Stewart y Oke (2012) que permite identificar la existencia de usos y coberturas de suelo urbanas y rurales. Se procedió a realizar clasificaciones supervisadas de las imágenes satelitales pre-procesadas mediante el Sistema de Información Geográfica SAGA (v.6.3.0), en el módulo *Local Climate Zone Classification*, en donde se aplicó un filtro que aproxima las celdas contiguas (*majority filter*) con radio de 3 píxeles, lo que equivale

a un radio de 90 metros. Esto con el objetivo de generalizar los errores en la identificación de pixeles aislados para las diferentes ZCL.

Tabla 1. Bandas e imágenes utilizadas para el periodo 1988-2020

	Puerto Montt			*Temuco*			*Valdivia*		
	1989	*2005*	*2020*	*1990*	*2005*	*2020*	*1988*	*2005*	*2020*
Fecha imágenes	07 jun	08 nov	02 ene	15 ene	24 ene	18 ene	09 nov	01 feb	06 abr
Imágenes	Landsat 4 TM	Landsat 7 ETM+		Landsat 4 TM	Landsat 7 ETM+		Landsat 4 TM	Landsat 5 TM	Landsat 8 OLI
Bandas	B1/B2/B3/B4/B5/B7			B1/B2/B3/B4/B5/B7			B1/B2/B3/B4/B5/B7		B2/B3/B4/B5/B6/ B7
Porcentaje nubosidad	<10%								
Resolución horizontal	30 m								

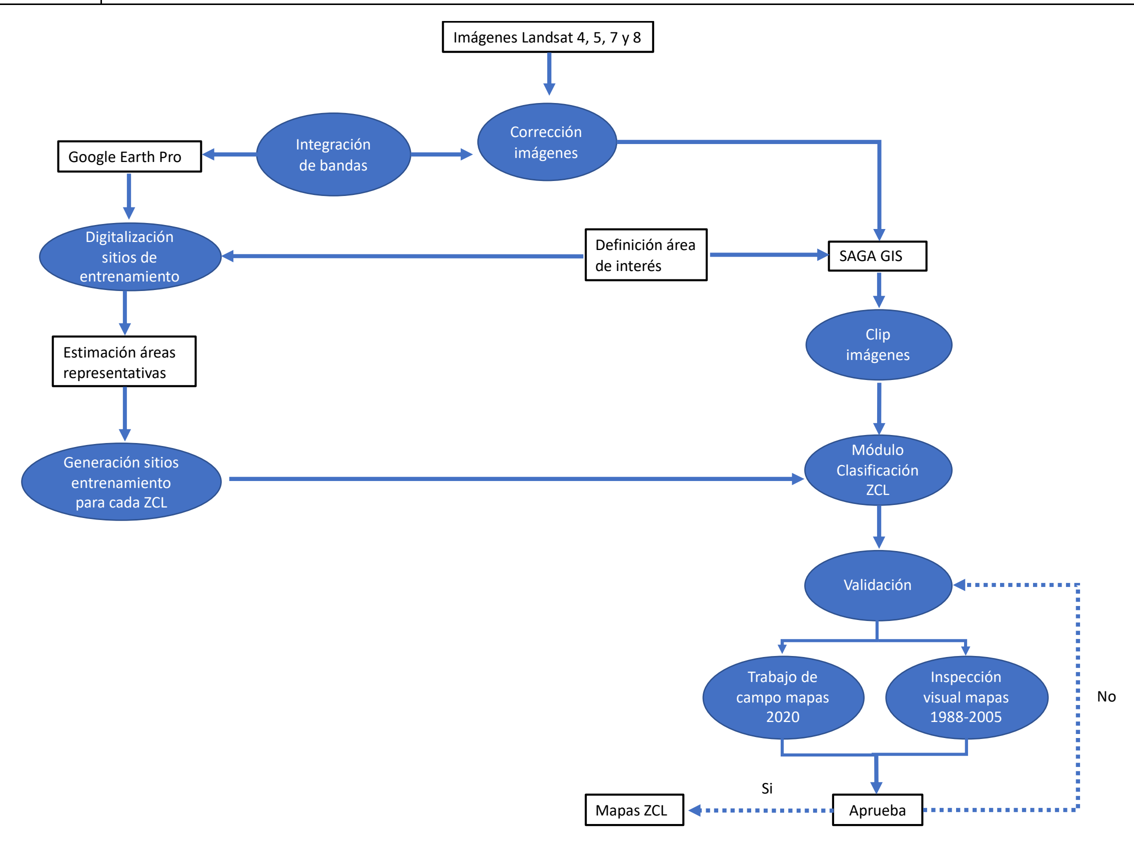


Figura 3. Flujo de trabajo para el mapeo de Zonas Climáticas Locales en SAGA.

Los mapas de ZCL generados fueron validados mediante inspección visual. Cada tipo de LCZ que se generó, se cotejó a través del conocimiento local de los investigadores sobre el área para los años 1988, 1989 y 1990. Para el periodo 2005 se utilizaron imágenes satelitales de alta resolución espacial del programa Google Earth Pro (GEP), y para el periodo 2020 el proceso de validación fue apoyado mediante visitas a terreno durante enero y febrero de 2022.

Posterior al proceso de generación de mapas de ZCL se procedió a realizar un análisis estadístico basado en una matriz de transición entre periodos para cada ciudad. Este método permite describir los cambios de superficie de cada uso y cobertura de suelo desde el estado inicial al último estado (Liu et al.,

2021). Para visualizar estos resultados de manera esquemática, se usó el diagrama de Sankey para evidenciar los cambios y trayectorias de las diferentes ZCL.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Mapeo de Zonas Climáticas Locales

Basado en las clasificaciones de ZCL realizadas para las ciudades de Temuco, Valdivia y Puerto Montt, es posible constatar que se expresa un incremento sostenido de los usos y coberturas de suelo entre el periodo 1988 y 2020 (Ver figura 4, 5 y 6). Dado el análisis que se realiza para estas ciudades y su hinterland, es posible identificar 9 categorías, donde 5 corresponden usos de suelo de tipo urbano, y 4 que caracterizan las coberturas de suelo existentes dentro del área de estudio de cada ciudad.

Para efectos de la identificación de ZCL la utilización del filtro post-clasificación de radio 90 metros permite que la identificación de las diferentes usos y coberturas de suelo sea más generalizada a la de la propia resolución de las imágenes Landsat, que corresponden a 30x30 metros.

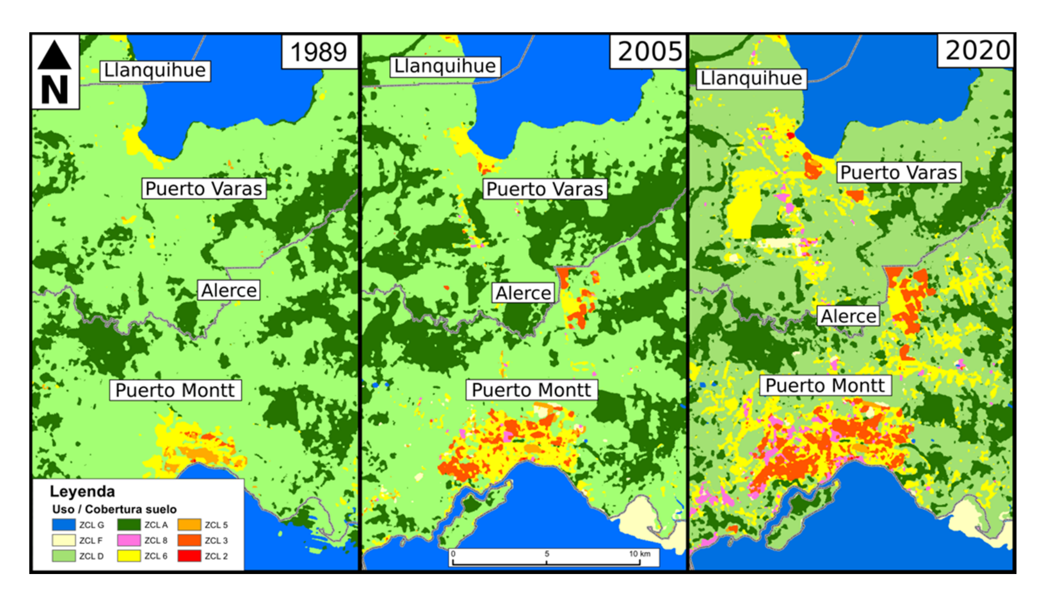


Figura 4. Mapeo de Zonas Climáticas Locales para la ciudad de Puerto Montt.

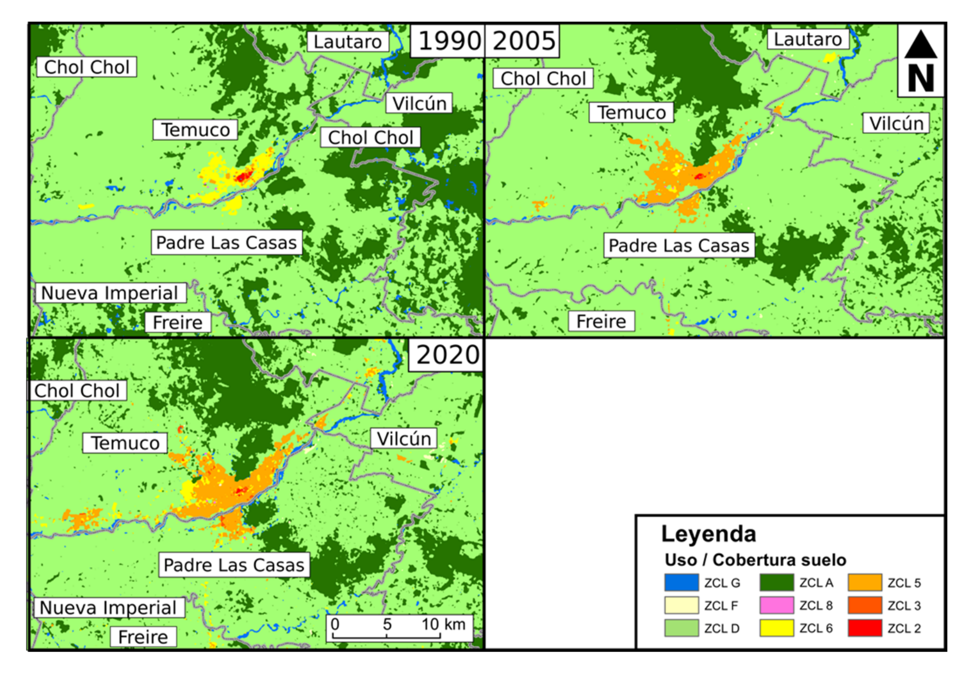


Figura 5. Mapeo de Zonas Climáticas Locales para la ciudad de Temuco.

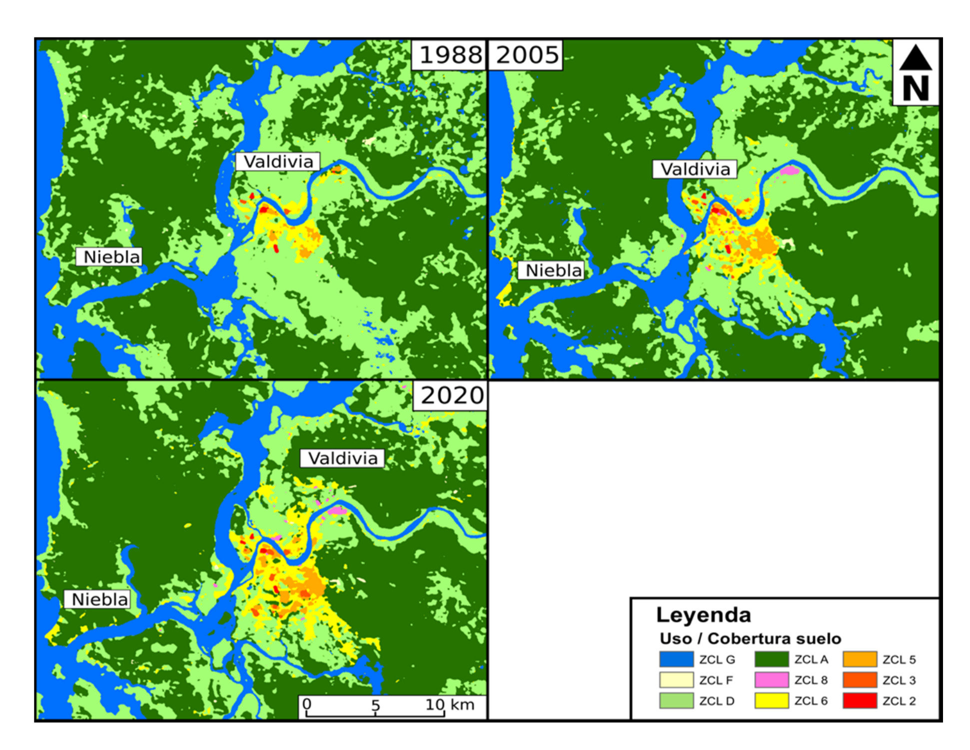


Figura 6. Mapeo de Zonas Climáticas Locales para la ciudad de Valdivia.

3.2. Dinámicas de cambios de cobertura y usos para las ciudades de la macrozona sur entre 1988-2005

En este primer periodo se observa que la distribución espacial de las ZCL está fuertemente marcada por aquellas coberturas que se encuentran en áreas rurales (zonas climáticas locales A y D, principalmente). Para el caso de la ciudad y el hinterland de Temuco se observa que las áreas urbanas de baja densidad, asociadas a las ZCL 5 y 6, pasan de ser 1.690,9 hectáreas para incrementar en 3.352,3 hectáreas. Esto equivale a un incremento de la superficie de 98,3% entre 1990-2005. En el caso de la ciudad de Valdivia y Puerto Montt, estas mismas zonas incrementaron en 78% y 63%, respectivamente. El caso de la ciudad de Valdivia es la que más experimenta un mayor incremente en su superficie urbana de baja densidad según las tipologías de ZCL (Ver tabla 2).

Tabla 2. Distribución de hectáreas del mapeo de ZCL para las ciudades e hinterland de Puerto Montt, Temuco y Valdivia entre 1988-2020.

	Puerto Montt			*Temuco*			*Valdivia*		
Tipo ZCL	*1989*	*2005*	*2020*	*1990*	*2005*	*2020*	*1988*	*2005*	*2020*
2	1,71	1,71	15,84	57,96	27,72	17,28	43,83	44,91	38,7
3	49,59	743,4	1689,03	32,49	16,29	144,99	20,25	66,69	101,43
5	219,33	230,4	320,72	166,14	3.019,23	4.123,53	196,74	491,85	614,79
6	1.170,72	2.036,79	5.348,20	1.524,78	333,45	1.323,18	925,11	1.502,19	3095,1
8	0	94,5	753,57	10,44	7,11	15,39	0	79,11	145,17
A	9.201,87	11.555,91	8.113,95	41.081,94	21.470,76	27.724,41	40.839,30	43.640,28	36.762,75
D	29.803,86	24.817,50	23.171,49	102.824,19	122.960,88	113.217,21	26.069,40	21.645,45	15.686,19
F	0	730,53	716,22	14,13	77,85	239,31	94,32	74,88	55,35
G	10.325,88	10.562,22	10.643,94	4.472,37	2.271,15	3.379,14	10.948,86	11.592,45	10.146,78
Total área de estudio (Ha)	50.772,96			150.184,44			79.137,81		

3.3. Dinámicas de cambios de cobertura y usos para las ciudades de la macrozona sur entre 2005-2020

Similar a las tendencias observadas en el periodo 1988-2005, es la ciudad de Valdivia la que posee mayores cambios en aquellas áreas asociadas a baja densidad de construcción (ZCL 5 y 6) siendo un 86% de incremento de superficie urbana entre 2005 y 2020. En esa misma línea de crecimiento de áreas destinadas a construcciones menos densas, se observa que tanto la ciudad de Temuco como Puerto Montt aumentaron en 62,5% y 150%, respectivamente. A diferencia del tipo de crecimiento de las áreas urbanas del periodo 1988-2005, es posible identificar que comienzan a desarrollarse nuevas áreas urbanas más dispersas. En el caso de la ciudad de Temuco y Puerto Montt se comienzan a identificar ZCL 5 y 6 hacia la periferia de sus áreas urbanas, que corresponderían a espacios abiertos con edificios de baja altura (1-3 pisos) y con gran presencia de vegetación arbustiva. Esta misma tendencia se repite en la ciudad de Valdivia, pero con presencia de construcciones mayores a tres pisos (ZCL 3) (Ver figura 7 y 8). En promedio, existe un incremento de 188,5% de ZCL 6 y que en su mayoría están localizadas dentro del hinterland de cada ciudad, es decir, se encuentran fuera de la mancha urbana consolidada existente al 2020.

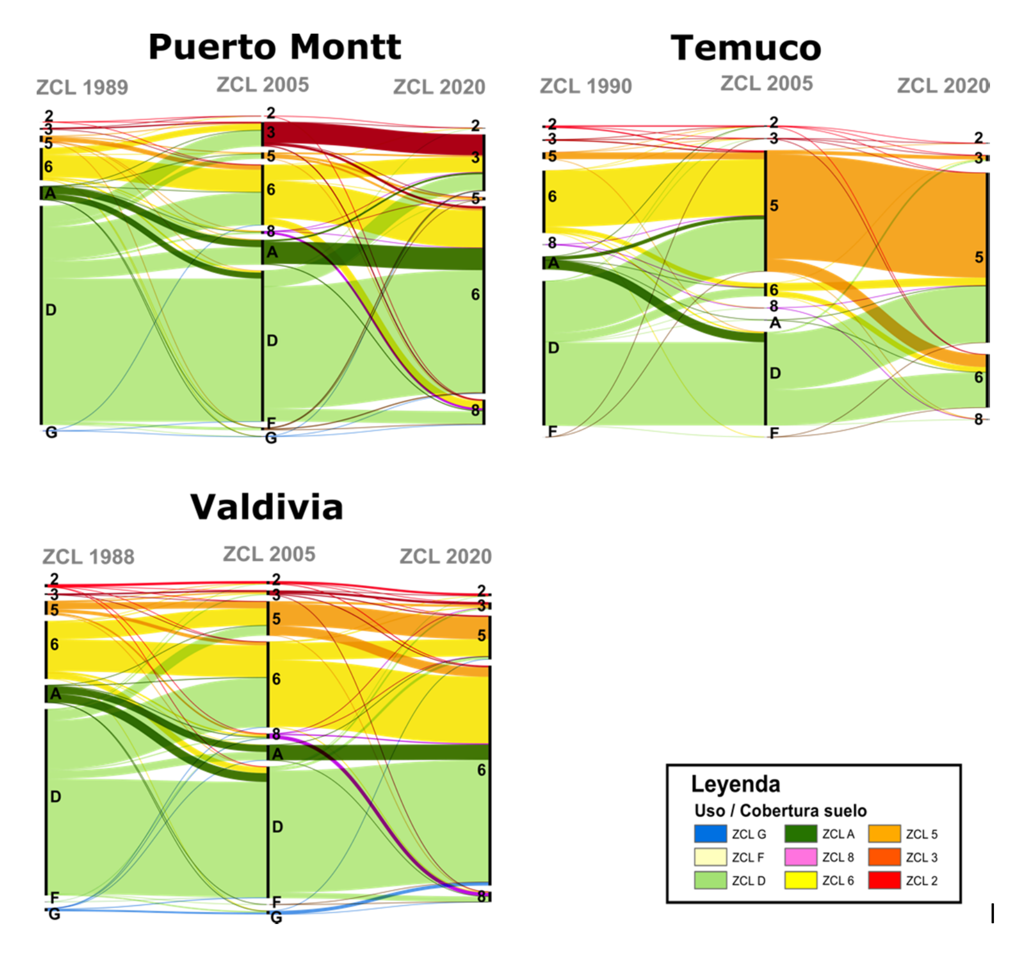


Figura 7. Diagrama de Sankey que evidencia la trayectoria de las ZCL entre 1988 y 2020 para las ciudades de Puerto Montt, Temuco y Valdivia.

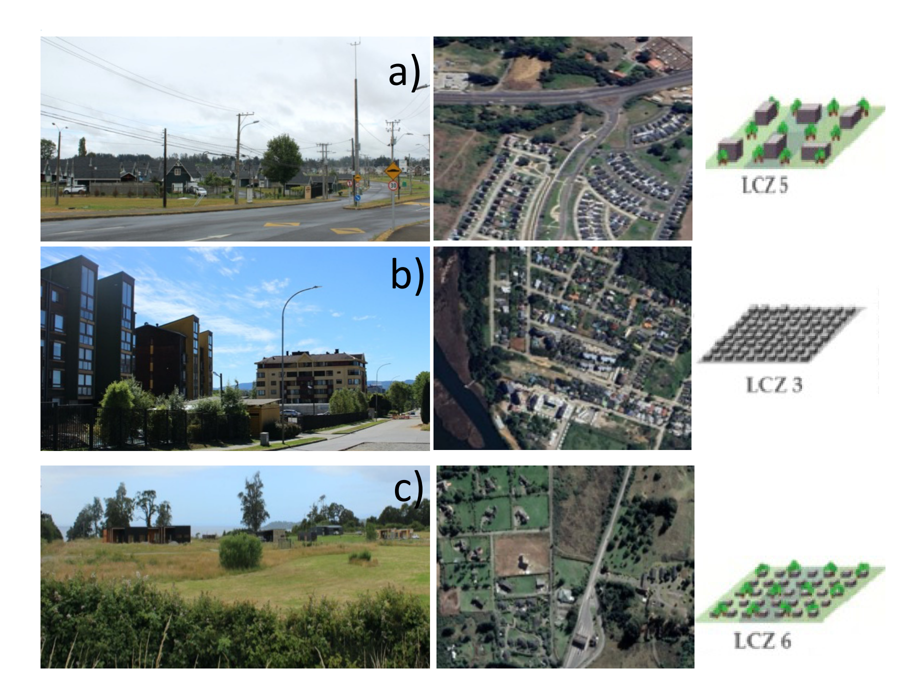


Figura 8. Paisaje urbano de mediana y baja densidad para las ciudades de Temuco, Valdivia y Puerto Montt para el periodo 2020. Nota: Sector (a) corresponde a la periferia de la ciudad de Temuco, sector Labranza para una ZLC 5; Sector (b) corresponde a procesos de urbanización dentro de límite urbano de la ciudad de Valdivia, sector Isla Teja para una ZCL 3; Sector (c) corresponde parcelas de agrado en la periferia de la ciudad de Puerto Montt en dirección norte hacia el área urbana de Puerto Varas para una ZCL 6.

4. CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentan los resultados preliminares de la aplicación del método de ZCL para la estimación de usos y coberturas de suelo en ciudades intermedias de la macrozona sur de Chile. La aplicación de la metodología para el mapeo de ZCL, permitió ser una adecuada herramienta para clasificación supervisada de imágenes satelitales. En términos comparativos, existen diferencias en la identificación de los mapas de usos y cobertura de suelo en base al método ZCL cuando se clasifican las diferentes imágenes Landsat. Sin embargo, es posible observar discordancias estadísticas y espaciales entre la cantidad de superficie estimada entre los diferentes periodos, lo que evidencia sobre estimaciones para las ZCL 3, 5 y 6, principalmente. En tal sentido, los resultados obtenidos evidencian que, en promedio, las ZCL 6 representan 2,9% de la superficie analizada, pero aumentan proporcionalmente más que el resto de las ZCL.

Otro elemento importante que destacar es que la generación de mapas de ZCL para las ciudades de Temuco, Valdivia y Puerto Montt se reconoce el conocimiento experto tanto en la definición de los sitios de entrenamiento como en la generación de mapas de usos y cobertura de suelo. Este tipo de conocimiento técnico permitió discriminar entre a tipologías de construcción para zonas de alta o baja densidad, sectores agrícolas o de cultivo, parques naturales, entre otros.

5. BIBLIOGRAFÍA

Aslam, A., Rana, I. A. (2022). The use of local climate zones in the urban environment: A systematic review of data sources, methods, and themes. *Urban Climate*, *42*. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101120

Bechtel, B., Alexander, P. J., Böhner, J., Ching, J., Conrad, O., Feddema, J., … Stewart, I. (2015). Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *4*(1), 199–219. https://doi.org/10.3390/ijgi4010199

Bustos-Gallardo, B., Prieto, M. (2019). Nuevas aproximaciones teóricas a las regiones-commodity desde la ecología política. *Revista Eure*, *45*(135), 153–176. https://doi.org/10.4067/S0250-71612019000200153

ENVI. (2009). Atmospheric correction module: QUAC and FLAASH user`s guide. IDL.

FAO. (2015). *Planning for sustainable use of land resources: Towards a new approach*. FAO Land and Water

Bulletin nº2. Roma, Land and Water Development División.

Kaufman, Y. J., Wald, A. E., Remer, L. A., Gao, B.-C., Li, R.-R., Flynn, L. (1997). The MODIS 2.1-µm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *35*(5), 1286–1298.

Liu, X., Fu, D., Zevenbergen, C., Busker, T., y Yu, M. (2021). Assessing Sponge Cities Performance at City Scale Using Remotely Sensed LULC Changes: Case Study Nanjing. *Remote Sensing*, 13(4), 580. http://dx.doi.org/10.3390/rs13040580

Maturana, F., Morales, M., Peña-Cortés, F., Peña, M. A., Vielma, C. (2021). Urban Growth, Real Estate Development and Indigenous Property: Simulating the Expansion Process in the City of Temuco, Chile. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *10*(2), 101. https://doi.org/10.3390/ijgi10020101

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2020). *Metodología para determinar las áreas funcionales de Chile*. Santiago de Chile, Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

Nel·lo, O. (2000). "Ciudades intensas. Reflexiones sobre el papel de las ciudades de la segunda corona metropolitana en la articulación del área urbana de Barcelona". En C. Bellet y J. M. Llop (Eds.), *Ciudades intermedias. Urbanización y sostenibilidad* (pp. 210–225). Lleida: Editorial Milenio.

Peet, R. (1970). Von Thünen theory and the dynamics of agricultural expansion. *Explorations in Economic History*, *8*(2), 181–201. https://doi.org/10.1016/0014-4983(70)90009-4

Pu, R., Landry, S., Zhang, J. (2015). Evaluation of Atmospheric Correction Methods in Identifying Urban Tree Species with WorldView-2 Imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *8*(5), 12.

Stewart, I. D. (2011). *Redefining the Urban Heat Island, PhD Thesis, University of British Columbia*. Revisado en https://circle.ubc.ca/handle/2429/38069.

Stewart, I. D., Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *American Meteorological Society*, 1880–1900.

Valenzuela, R. (1993). Perdida Y Degradacion De Suelos En America Latina y El Caribe. *Revista Eure*, *21*(58), 61–72.

Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., Herold, M. (2021). Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature Communications*, *12*(1), 1–10. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2

Zunino, H., Hidalgo, R. (2009). "Las políticas de vivienda en el Chile neoliberal: Efectos socioespaciales y relaciones de poder en el caso del área metropolitana de Valparaíso y su periferia". En R. Hidalgo, C. De Mattos, y F. Arenas (Eds.), *Chile: Del país urbano al país metropolitano* (pp. 75 – 90). Santiago de Chile: Serie GEOLibros.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 87-96

Caracterización de las bases de datos de usos y coberturas del suelo: de la escala global a la autonómica

S.F. Nanu[1], M.T. Camacho Olmedo[1], D. García-Álvarez[2]

[1]Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Universidad de Granada, Campus de Cartuja s/n, 18071 Granada.
[2]Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Alcalá, Calle Colegios, 2, Alcalá de Henares. 28801 Madrid.

sabinananu@ugr.es, camacho@ugr.es, david.garcia@uah.es

RESUMEN: Los avances en el ámbito de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIGs), y concretamente en la Teledetección, han propiciado una producción importante de bases de datos de usos y coberturas del suelo (LUC, *Land Use/Cover*). Estas bases de datos muestran una gran diversidad, ligada a la extensión del área abarcada, la escala y resolución espacial, o la resolución temporal y temática, entre otros. En esta comunicación se analizan 33 bases de datos generales de usos y coberturas del suelo, desde la escala global hasta la autonómica (Andalucía), siendo 17 de ellas globales, 10 europeas, 3 españolas y 3 andaluzas. El objetivo es analizar los parámetros espaciales, temporales y temáticos de estas bases de datos para que los usuarios puedan elegir la más apropiada para sus propósitos. Se trata de un estudio de las bases de datos LUC según parámetros espaciales tales como la resolución espacial, la escala cartográfica, la Unidad Mínima Cartografiable (UMC), el Ancho Mínimo Cartografiable (AMC), el Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC); parámetros temporales, como su extensión temporal y el número de fechas disponibles; y parámetros relativos al detalle temático, en relación con el número de categorías.

Palabras-clave: bases de datos de usos y coberturas del suelo, resolución espacial, resolución temática, resolución temporal.

1. INTRODUCCIÓN

Los mapas de usos y coberturas del suelo (LUC, *Land Use/Cover*) se utilizan en numerosos ámbitos, tanto en estudios sobre el cambio climático (Sophie et al., 2011), la erosión del suelo (Cebecauser y Hofierka, 2008) o los servicios ecosistémicos (Hu et al., 2008), como en estudios más ligados a las ciencias sociales, la economía y la planificación territorial a diferentes escalas (Geoghegan, 1998), así como para evaluar el cumplimiento de las agendas globales, como la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Los avances en el ámbito de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIGs), y particularmente en Teledetección, o la demanda creciente de este tipo de información geográfica y la promoción del acceso abierto a estos datos, han contribuido a la generación y distribución de un gran número de bases de datos de usos y coberturas del suelo. Estas bases de datos presentan una gran diversidad, tanto en relación con su extensión espacial (global, continental, nacional o regional), temporal (bases de datos de una sola fecha o con una serie temporal), como en relación con su resolución temática. A este respecto, podemos diferenciar entre bases de datos generales, que cartografían todos los tipos de usos y coberturas, y bases de datos temáticas, centradas en un único tipo de cobertura (artificial, agrícola, vegetal, etc.).

En esta comunicación se analizan 33 bases de datos generales de usos y coberturas, desde la escala global hasta la autonómica, tomando como referencia para la escala continental las bases de datos europeas, para la nacional, las bases de datos españolas y, para la autonómica, las bases de datos andaluzas. El objetivo es revisar las características principales de estas bases de datos de acuerdo con sus parámetros espaciales, temporales y temáticos, con el propósito de dar una visión generalizada para que los potenciales usuarios puedan decidir con fundamento qué bases de datos utilizar de acuerdo a sus objetivos. Estos factores afectan a la incertidumbre de los datos geoespaciales, entendiéndose como tal el grado de certeza que hay entre la diferencia entre la realidad y su representación gráfica (Castilla y Hay, 2007).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta comunicación parte de la revisión de bases de datos LUC generales con extensión global y supranacional realizada por García-Álvarez et al. (2022). Adicionalmente, hemos revisado las bases de datos españolas y andaluzas disponibles. En todos los casos, hemos procedido a la descarga de las bases de datos y de su documentación técnica. En este sentido, las 33 bases de datos revisadas han sido obtenidas de fuentes muy variadas: desde portales que proveen información LUC a escala global (FAO GeoNetwork, *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC), etc.), a escala europea (*Copernicus Land Monitoring Service*), servidores nacionales (Centro Nacional de Información Geográfica del Instituto Geográfico Nacional, CNIG-IGN), hasta el geoportal andaluz REDIAM (Red de Información Ambiental de Andalucía).

Las bases de datos revisadas se han clasificado en varios grupos según su extensión espacial (globales, europeas, españolas, andaluzas) y temporal (una o varias fechas). El análisis de cada una se realiza mediante comparaciones de varios parámetros espaciales, temporales y temáticos. Las variables espaciales aluden a la resolución espacial o tamaño de píxel, escala cartográfica, Unidad Mínima Cartografiable (UMC), Ancho Mínimo Cartografiable (AMC) y Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC). Los criterios seleccionados para la resolución temporal son las fechas disponibles, representadas mediante una línea temporal, y el número de fechas que tiene cada base de datos. El parámetro temático escogido es el número total de categorías de las leyendas.

Para homogeneizar las bases de datos, hemos excluido las categorías referidas a "*No data*", "Sin clasificar", "Áreas interrumpidas", "Falta de datos", "Nubes", "Sin datos de entrada" o similares. En el caso de las leyendas jerárquicas (CLC, N2K, Riparian Zones, Coastal Zones o SIPNA OS), con varios niveles de categorías, solo se ha tenido en cuenta el nivel más detallado. GLASS 2.0 Global y MCD12Q1 presentan hasta seis leyendas diferentes, de las que hemos seleccionado la más común en ambos casos, que es la IGBP (*International Geosphere-Biosphere Programme legend*).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Parámetros espaciales

La información geográfica digital se representa mediante dos modelos de datos, ráster y vectorial. 11 de las 33 bases de datos analizadas son vectoriales (Tabla 1). Todos los mapas LUC globales analizados aquí son de tipo ráster. Los europeos tienen el formato ráster y vectorial en la misma proporción, salvo CLC, que se distribuye en ambos formatos. Los mapas LUC españoles son vectoriales y la mayoría de los mapas andaluces se producen en el modelo vectorial, se transforman a ráster y se distribuyen en ambos modelos. En este sentido, aquellas bases de datos que se distribuyen en ambos formatos suelen producirse originalmente en formato vectorial y, para facilitar su uso y cumplir con las demandas de los usuarios, se transforman y distribuyen –simplificadas a menores niveles de detalle– en formato ráster.

Mientras que las bases de datos de tipo ráster se obtienen a partir de técnicas tradicionales de teledetección (clasificaciones supervisadas y no supervisadas), las bases de datos de tipo vectorial suelen obtenerse a través de técnicas de fotointerpretación tradicional o fusión de datos, que permiten incrementar la precisión y detalle de aquello que se mapea. Esto explica que el formato vectorial domine en las bases de datos de alto detalle, como las españolas, andaluzas o los productos temáticos europeos del programa Copernicus (Urban Atlas, N2K, Riparian Zones, Coastal Zones), mientras que el formato ráster domina en las bases de datos globales y continentales, obtenidas a través de procesos de producción automáticos o semi-automáticos basados en técnicas avanzadas de teledetección.

En las bases de datos ráster, la resolución espacial o tamaño de píxel determina el nivel de detalle de los datos. La mayoría de las bases de datos globales con una fecha tienen una resolución espacial de 1 km; el resto varía entre 10 m, como en el caso de OSM LULC y ESRI 2020 LC, y 9,2 km para LADA LUC map (Tabla 1). Las bases de datos LUC globales con serie temporal tienen un tamaño de píxel más heterogéneo: desde los 10 m (FROM-GLC) hasta los 5 km (GLASS-GLC). Algunas bases de datos de este grupo tienen dos resoluciones espaciales, normalmente consecuencia del uso de diferentes imágenes satélite en la producción de cada fecha. Por ejemplo, FROM-GLC se ha producido en distintas fechas con imágenes de satélite de Landsat (las ediciones de 2010, 2015 y 2017, con una resolución espacial de 30 m) y Sentinel (la edición de 2017, con una resolución espacial de 10 m). De esta manera, el detalle espacial de las bases de datos LUC y, en específico, de las bases de datos en formato ráster, queda determinado por el nivel de detalle de las imágenes de satélite a partir de las que se generan. Con el desarrollo de nuevos sensores y misiones, que proporcionan imágenes de satélite con mayores niveles de resolución espacial y espectral, la disponibilidad de fuentes de datos más detalladas es cada día más amplia, lo que explica el aumento de la resolución espacial de las bases de datos

LUC con el paso de los años. Un ejemplo de ello sería UMD LC, producida entre 1992 y 1993 mediante clasificación supervisada de imágenes de satélite con sensores AVHRR, con un tamaño de pixel de 1 km, mientras que S2GLC 2017, de producción más reciente, con metodología automatizada de clasificación de imágenes de Sentinel 2, tiene una resolución espacial de 10 m.

En el caso de los mapas LUC europeos, el tamaño de píxel oscila entre 10 m para S2GLC 2017 y 1 km para HILDA y PELCOM. Las bases de datos andaluzas en formato ráster se distribuyen a dos resoluciones diferentes, que oscilan entre 16 y 48 m según el nivel de desagregación de la leyenda. En general, se observa una relación inversa entre la resolución espacial y el área cubierta por las bases de datos: a mayor extensión, menor resolución espacial y viceversa. De esta forma, cuánto menor es el área a cartografiar, más fácil es encontrar datos detallados de alta resolución y más factible resulta invertir recursos para mapear los usos y coberturas con alto nivel de detalle, que a escalas globales y continentales requeriría de una gran cantidad de recursos económicos y de personal. El proyecto CORINE Land Cover (CLC) es un ejemplo de ello, en tanto supone la coordinación de 39 equipos de producción nacionales (European Environment Agency, 2007).

Tabla 1. Parámetros espaciales y temporales de los mapas LUC

Bases de datos LUC	*Modelo de datos*	*Resolución espacial*	*Escala cartográfica*	*UMC*	*AMC*	*SRC*	*Resolución temporal*
						SRID	*Nº fechas*
Bases de datos LUC generales globales con una fecha							
UMD LC	Raster	1km	-	-	-	4326	1
GLCC 2.0 Global	Raster	1km	-	-	-	4326, otro	1
GLC 2000	Raster	1km	-	-	-	4326	1
Geo-Wiki Hybrid	Raster	300m	-	-	-	Otro	1
LADA LUC map	Raster	≈ 9,2km	-	-	-	4326	1
GLC-SHARE	Raster	1km	-	-	-	4326	1
OSM LULC	Raster	10m	-	-	-	Otro	1
ESRI 2020 LC	Raster	10m	-	-	-	32630	1
Bases de datos LUC generales globales con serie temporal							
GLASS-GLC	Raster	5km	-	-	-	4326	34
LC-CCI	Raster	300m	-	-	-	4326	27
GLC30	Raster	30m	-	-	-	32630	3
GLC250	Raster	250m	-	-	-	53008	2
MCD12Q1	Raster	500m	-	-	-	Otro	20
GLCNMO	Raster	1km	-	-	-	4326	1
		500m					2
GlobCover	Raster	300m	-	-	-	4326	2
FROM-GLC	Raster	30m	-	-	-	32630, 4326	3
		10m				4326	1
CGLS-LC100	Raster	100m	-	-	-	4326	5
Bases de datos LUC generales europeas							
HILDA	Raster	1km	-	-	-	3035	12
CLC	Raster, Vectorial	100m	1:100.000	25ha	100m	3035	5
PELCOM	Raster	1km	-	-	-	Otro	1

Annual Land Cover	Raster	30m	-	-	-	3035	20
GlobCorine	Raster	300m	-	-	-	4326	1
Urban Atlas	Vectorial	-	1:10.000	0,25-1ha	10m	3035	3
N2K	Vectorial	-	1:5.000/1:10.000	0,5ha	10m	3035	3
Riparian Zones	Vectorial	-	1:10.000	0,5ha	10m	3035	2
Coastal Zones	Vectorial	-	1:10.000	0,5ha	10m	3035	2
S2GLC 2017	Raster	10m	-	-	-	32630	1
Bases de datos LUC generales españolas							
SIOSE	Vectorial	-	1:25.000	0,5-2ha	15m	25830	4
SIOSE AR	Vectorial	-	*1:1.000/1:5.000*	-	-	25830	1
MFE	Vectorial	-	1:50.000	2,5-6,25 ha	25m	25830	1
			1:25.000	0,5-2ha	-	4258	1
Bases de datos LUC generales andaluzas							
MUCVA	Vectorial	-	1:100.000, 1:50.000	-	-	3042	6
	Raster, Vectorial	38m	1:25.000	0,25ha	-	25830	6
SIOSEA OS	Raster, Vectorial	16m, 38m	1:10.000	0,005-0,02ha	10m	25830, 3042	5
SIPNA OS	Raster, Vectorial	23m, 48m	1:10.000	-	-	25830	2

En las bases de datos vectoriales, la escala cartográfica indica el nivel de detalle o *zoom* que se ha empleado para fotointerpretar los datos y obtener las capas. Entre las bases de datos europeas, CLC se realiza a una escala 1:100.000, mientras que los productos temáticos del programa Copernicus se obtienen a escalas muy detalladas y comparables a las de los productos nacionales y autonómicos. N2K se realiza a escala 1:5.000 y, entre el resto de productos, predomina la escala 1:10.000. Para España, SIOSE se realizaba a escala 1:25.000 y el nuevo SIOSE AR no tiene una escala específica, si bien el Equipo Técnico Nacional de SIOSE (2020) aclara que los datos son utilizables en el rango 1:1.000 - 1:5.000. SIOSE AR se obtiene a partir de la fusión de datos de distintas fuentes con un alto nivel de detalle y, por tanto, no se fotointerpreta a partir de imágenes aéreas o de satélite a la misma escala. En las bases de datos LUC andaluzas la escala oscila entre 1:10.000 para SIOSEA OS y SIPNA OS y 1:100.000 para algunas versiones de MUCVA. Esta última escala, poco detallada, se explica por la fuente a partir de la que estos datos se obtuvieron y su mejor nivel de detalle: vuelos históricos como el vuelo americano de la Serie B (Moreira Madueño, 2007).

La escala cartográfica no varía conforme disminuye la extensión de las bases de datos, como ocurre con la resolución espacial en las bases de datos de tipo ráster. La mayoría de las bases de datos europeas vectoriales tienen una escala de 1:10.000, similar o incluso mayor que la escala cartográfica de las bases de datos españolas y andaluzas (Tabla 1). Esto se debe a que la mayor parte de las bases de datos europeas cartografían zonas concretas de Europa con un alto nivel de detalle, tales como áreas urbanas, riparias, litorales o espacios protegidos. CLC cartografía la totalidad del territorio europeo de forma genérica y su escala es 1:100.000.

Las bases de datos LUC vectoriales llevan asociada una Unidad Mínima Cartografiable (UMC) y un Ancho Mínimo Cartografiable (AMC). La primera determina la superficie mínima que deben tener los objetos para ser mapeados, mientras que la segunda se refiere a la anchura mínima que deben tener los objetos lineales (Manakos y Braun, 2014). En los mapas LUC europeos la UMC varía entre 0,25 hectáreas para Urban Atlas y 25 ha para CLC, y el AMC entre 10 m para la mayoría de los datasets y 100 m para CLC. Los mapas LUC españoles muestran diferentes UMC, de 0,5 a 6,25 ha, dependiendo de sus escalas. SIOSE AR no tiene UMC definida, debido a su producción como fusión de fuentes de datos a distintos niveles de detalle. No obstante, por razones técnicas, los elementos deben tener 1 m^2 para ser cartografiados (Equipo Técnico Nacional SIOSE, 2020). En cuanto a los mapas LUC andaluces, la UMC es mucho menor para SIOSEA OS (0,005-0,02 ha) que

para MUCVA (0,25 ha). Al igual que con el caso de la escala cartográfica, no existe una relación directa entre la UMC y AMC de las distintas bases de datos analizadas y su extensión espacial. Esto se explica por el distinto nivel de detalle al que las diferentes bases de datos han sido creadas.

Respecto a los Sistemas de Referencia de Coordenadas (SCR), encontramos una gran variedad según sus códigos SRID (*Spatial Reference System Identifier*), el estándar habitual de clasificación de los sistemas de coordenadas y de las diferentes proyecciones asociadas (Tabla 1). Para muchos, desconocemos con precisión esta información, lo que introduce importantes limitaciones e incertidumbres en el uso de estas bases de datos, especialmente cuando se usan de manera conjunta con otras capas. Varias bases de datos tienen un SRC geográfico (Tabla 2), cuyas coordenadas se expresan en grados decimales, mientras que otras tienen un SRC proyectado, con coordenadas en metros. Este aspecto puede condicionar el análisis de las bases de datos si se pretende comparar (es decir, superponer) uno que tiene un SRC geográfico con otro mapa con coordenadas proyectadas. La transformación entre uno y otro conlleva una modificación importante de la localización los píxeles, con pérdidas y duplicados de los mismos (Seong y Usery, 2001), lo que provoca cambios en la distribución de las categorías LUC.

Aunque la mayoría de las bases de datos LUC tienen un solo SRC, otras tienen dos: uno geográfico y otro proyectado (FROM-GLC, MFE), o bien dos SRC proyectados (SIOSEA OS, MUCVA). Esto suele ser debido a que las diferentes versiones de las bases de datos se hicieron en diferentes periodos de tiempo (FROM-GLC, SIOSEA OS) o bien a la distribución de las bases de datos en varias escalas (MFE, MUCVA).

Tabla 2. Códigos SRID de los Sistemas de Referencia de Coordenadas y los tipos de proyección

Spatial Reference System Identifier (SRID)	*Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC)*			*Tipo de SRC*	*Tipo de proyección*
	Nombre completo	*Datum*	*Método de proyección*		
EPSG: 3035	ETRS89-extended / ETRS-LAEA Europe	European Terrestrial Reference System 1989	Lambert Azimuthal Equal Area	Proyectado	Equivalente
EPSG: 3042	ETRS89 / UTM zone 30N (N-E)	European Terrestrial Reference System 1989	Universal Transverse Mercator	Proyectado	Conforme
EPSG: 4258	ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989	-	Geográfico	-
EPSG: 4326	WGS84 - World Geodetic System 1984	WGS 1984	-	Geográfico	-
EPSG: 25830	ETRS89 / UTM zone 30N	European Terrestrial Reference System 1989	Universal Transverse Mercator	Proyectado	Conforme
EPSG: 32630	WGS 84 / UTM zone 30N	WGS 84	Universal Transverse Mercator	Proyectado	Conforme
ESRI: 53008	Sphere Sinusoidal	No especificado	Sinusoidal	Proyectado	Equivalente

3.2. Parámetros temporales

La resolución temporal nos indica la utilidad de las bases de datos LUC para estudios de cambios de usos y coberturas del suelo (LUCC, *Land Use/Cover Change*). Cuantas más fechas tenga una base de datos LUC, más sólido puede ser el análisis temporal, si bien dos fechas son suficientes para realizar una comparación de cambios de usos y coberturas.

De las bases de datos revisadas, un nutrido grupo de bases de datos globales solo cuenta con datos para una única fecha (Tabla 1). Por tanto, resultan poco útiles para estudiar los cambios de la superficie terrestre, ya que solo permiten caracterizarla en un momento concreto. Algunas de esas bases se han producido para una única fecha, pero a partir de información de varios años: UMD LC, GLCC 2.0 Global, GLC

2000, en dos años, y Geo-Wiki Hybrid en seis años (Figura 1). De este modo, en algunos casos, estas bases de datos se han obtenido a partir de la clasificación de imágenes de satélite para un periodo temporal de dos o más años. Otras bases de datos, como GLC-SHARE u OSM LULC, han sido obtenidas a partir de la agregación de diferentes bases de datos LUC, con lo que, aunque tienen un año de referencia, para cada región de la Tierra las coberturas se cartografían en una fecha distinta, correspondiente con aquella de la base de datos que se haya escogido para cartografiar ese territorio. Esto introduce una incertidumbre importante si se quiere emplear este tipo de fuentes en cualquier tipo de análisis temporal. También en el caso de que queramos caracterizar los elementos de la superficie terrestre para un momento en específico, por cuanto desconocemos a qué momento concreto corresponde la imagen LUC.

Las bases de datos globales que cuentan con una serie temporal muestran situaciones muy contrastadas, desde las que sólo tienen dos fechas (GLC250 de 2001 y 2010, GlobCover de 2005 y 2009), hasta las de mayor resolución temporal, como MCD12Q1 con 20 fechas, LC-CCI con 27 y GLASS-GLC con 34 fechas disponibles. Del grupo de mapas europeos merece especial atención HILDA, con 12 fechas desde 1900 hasta 2010, uno por década, y Annual Land Cover con 20 fechas desde 1990 hasta 2019, una por año (Figura 1). CLC tiene cinco fechas y es una de las bases de datos LUC más utilizadas para los análisis temporales, lo que se explica por su alto nivel de detalle, fiabilidad y por tratarse de una fuente histórica que cuenta con un archivo de datos relevante.

Las bases de datos temporalmente más completas son GLASS-GLC, LC-CCI, MCD12Q1 y el europeo Annual Land Cover, ya que tienen un mapa por año desde 1982 a 2015, 1992 a 2018, 2001 a 2020 y 2000 a 2019 respectivamente. HILDA es la base de datos que tiene información LUC más antigua, si bien cuenta con escaso nivel de detalle espacial y temático. Además, es preciso comprender la finalidad y origen de esta base de datos, creada a partir de datos históricos y la modelización de territorios pasados a partir de la referencia proporcionada por una capa LUC actual (Fuchs, 2015). En este sentido, a la hora de valorar la utilidad práctica real de estas bases de datos, cabe comprender su finalidad y metodologías de producción. En muchas ocasiones, la comparación interanual de las distintas capas de estas bases de datos comporta altos niveles de incertidumbre, debido a problemas o cambios de tipo metodológico, que impiden acometer, con un mínimo de fiabilidad, estudios del cambio de usos y coberturas del suelo (Sulla-Menashe et al., 2019).

En cuanto a los mapas LUC españoles, SIOSE tiene cuatro fechas comprendidas entre 2005 y 2014. Su versión actualizada, SIOSE AR, tiene como fecha de referencia 2017, si bien actualmente se encuentra en proceso de producción y distribución. Pese a que SIOSE AR es el heredero de SIOSE, ambas bases de datos no son compatibles entre sí, al obtenerse mediante diferentes métodos y estrategias de producción, lo que impide la comparación de la serie histórica. MFE está disponible para dos fechas, aunque se han desarrollado con datos de varios años: una versión entre 1997 y 2006 y otra entre 2007 y 2017. Al igual que en el caso de SIOSE, debido a cambios en la metodología de producción entre fechas, no resultan comparables. Finalmente, entre las bases de datos LUC andaluzas, MUCVA cuenta con 10 fechas desde 1956 hasta 2007, SIOSEA OS con una resolución temporal de 5 años entre 2005 y 2014, y SIPNA OS, el más reciente y actualizado, cuenta con dos fechas (2018, 2020). Las bases de datos andaluzas presentan también los mismos problemas de compatibilidad entre ellas que las bases de datos nacionales. Pese a contar con sistemas de clasificación de categorías compatibles entre sí, han sido obtenidas mediante diferentes metodologías de producción y, por tanto, no son interoperables para acometer estudios del cambio de usos y coberturas del suelo. De esta manera, uno de los grandes problemas asociados a la producción de bases de datos LUC de gran detalle es la creación de series históricas de datos consistentes, que hagan posible acometer de forma fácil y fiable estudios del cambio de usos y coberturas del suelo (Lambin y Geist, 2006; Brown et al., 2012; Gallardo y Martínez-Vega, 2016). MUCVA consiguió esto de manera bastante acertada en Andalucía hasta el año 2007, cuando dejó de actualizarse y se sustituyó por SIOSEA. Hasta ese momento, constituía una base de datos ejemplar por su enorme detalle y desarrollo a partir de tareas de fotointerpretación, no contando con ningún otro equivalente similar (Moreira Madueño, 2007).

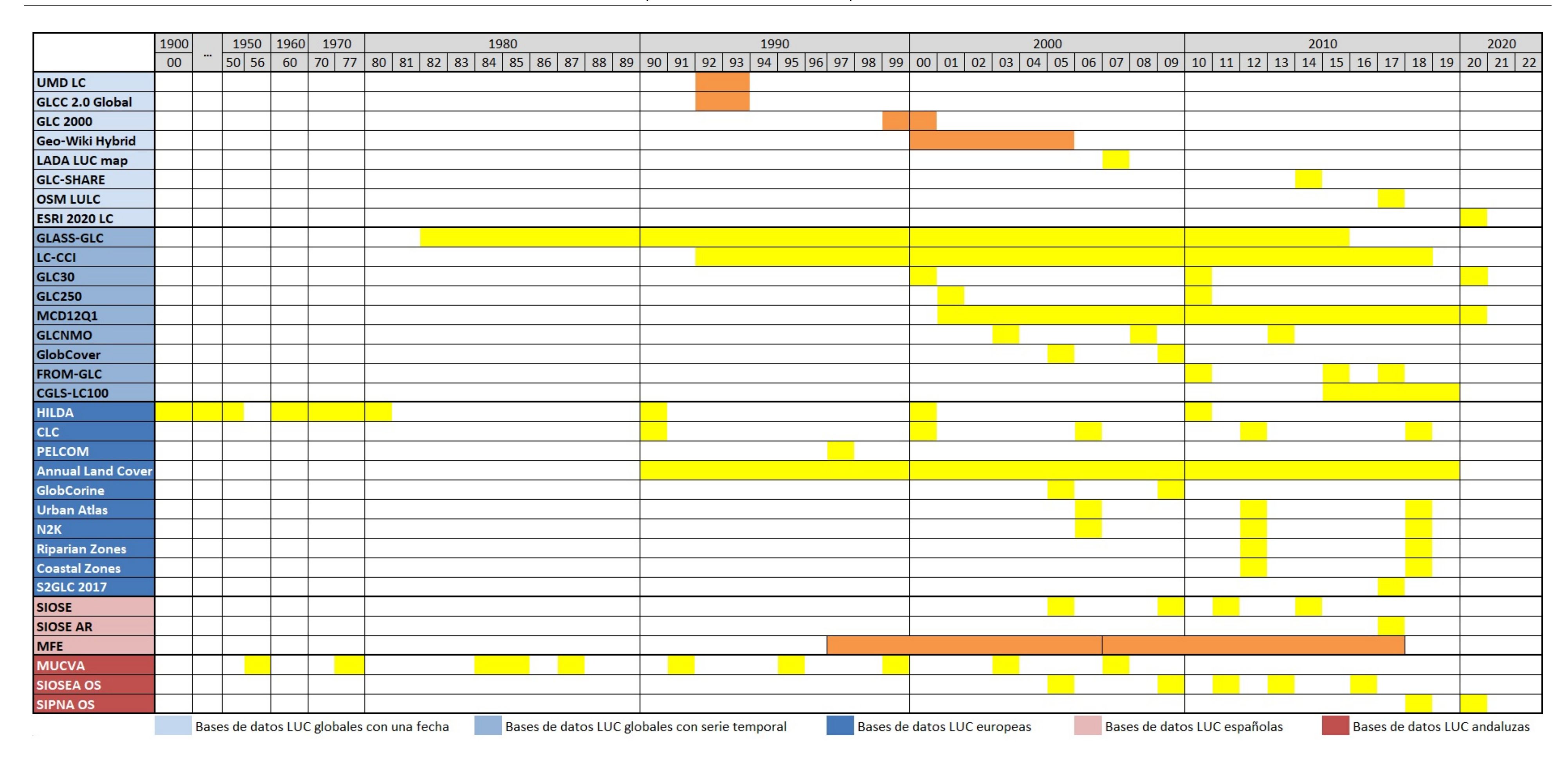


Figura 1. Resolución temporal. Las fechas señaladas en naranja se refieren a bases de datos que tienen una fecha, pero se realizaron con información de varios años

3.3. Parámetros temáticos

Algunas bases de datos presentan varios sistemas de clasificación o resoluciones temáticas, de acuerdo con sus diferentes ediciones (FROM-GLC), escalas cartográficas (MFE), ediciones y escalas (MUCVA) o versiones temáticas (Figura 2). GLCC 2.0 Global y MCD12Q1 se distribuyen de acuerdo a seis sistemas de clasificación distintos, habiendo escogido para este estudio la más común. SIOSE y SIOSE AR separan los usos del suelo de las coberturas del suelo, con un sistema de clasificación distinto en cada caso.

Se observa una relación entre el número de categorías y la extensión del área que cubren las bases de datos, siendo el número de categorías menor en los mapas globales, y mayor conforme se reduce la extensión en los mapas continentales, nacionales y, sobre todo, autonómicos. Como norma general, cuanto menor es el área cubierta por las distintas bases de datos, mayor es el detalle con el que se cartografían los usos y coberturas del suelo y, por ende, mayor es el detalle con el que se diferencian las distintas categorías de usos y coberturas.

La resolución temática de los mapas globales varía entre 7 y 40 categorías (Figura 2). Dos de ellos tienen menos de 10 clases (ESRI 2020 LC, GLASS-GLC) y otros dos tienen entre 30 y 40 categorías (LADA LUC map y LC-CCI), mientras que el resto presenta entre 10 y 29 clases. Respecto a las bases de datos LUC europeas, el número de categorías es muy contrastado: de las 6 clases de HILDA, 33 de Annual Land Cover hasta las 71 categorías de Coastal Zones (Nivel 5). Tal diferencia se corresponde con el distinto nivel de detalle espacial de cada base de datos, así como con sus distintas metodologías de producción. HILDA se obtiene a partir de técnicas de modelización y fuentes de datos históricas muy imprecisas y limitadas (Fuchs et al., 2015). Coastal Zones, al contrario, se realiza con técnicas de teledetección y fotointerpretación de alto detalle y sobre ámbitos muy concretos (European Environment Agency, 2021).

En el caso de las bases de datos LUC españolas, SIOSE tiene una resolución temática de 15 usos (según la clasificación HILUCS, *Hierarchical INSPIRE Land Use Classification System)* y 46 coberturas del suelo (de la clasificación CODIIGE, Consejo Directivo de la Infraestructura de Información Geográfica de España), además de su propia clasificación de categorías y atributos, que no es objeto de análisis de esta comunicación. SIOSE AR posee 85 usos y 64 coberturas del suelo y MFE tiene 35 categorías de usos del suelo en la versión 1:50.000 y 71 en la de 1:25.000. A diferencia de las bases de datos globales y continentales, por su alto nivel de detalle y metodologías de producción, no únicamente asociadas a técnicas automáticas o semi-automáticas de teledetección, estas bases de datos consiguen diferenciar claramente entre usos y coberturas, cuya disociación es uno de los grandes problemas que habitualmente se ha planteado en la producción de cartografía LUC (Comber, 2008). Entre las bases de datos LUC andaluzas, la resolución temática es muy alta: desde las 20, 58, 92 y 112 de las diferentes versiones de MUCVA, hasta las 181 categorías de SIOSEA OS y 458 de SIPNA OS. La diferente resolución temática de las distintas ediciones del MUCVA se corresponde con las restricciones técnicas impuestas por el uso de fuentes históricas de información para obtener las primeras ediciones de esta base de datos.

4. CONCLUSIONES

Se han revisado y caracterizado los parámetros espaciales, temporales y temáticos de 33 bases de datos generales de usos y coberturas del suelo a escala global, europea, española y autonómica (Andalucía). Los resultados muestran una variedad considerable de bases de datos con características muy diversificadas, pero complementarias.

Los distintos parámetros analizados guardan una estrecha relación entre sí. Las resoluciones espacial y temática aumentan progresivamente conforme menor es el área cubierta por las distintas bases de datos. El trinomio escala cartográfica, Unidad Mínima Cartografiable (UMC) y Ancho Mínimo Cartografiable (AMC) varía de forma conjunta en bases de datos vectoriales de usos y coberturas del suelo. Como norma general, cuánto mayor es el área cubierta por la base de datos, menor es su nivel de detalle especial y temático y, por tanto, más pequeña es su escala.

La mayor parte de las bases de datos recoge información sobre periodos temporales similares, que se extienden fundamentalmente entre finales del siglo XX y principios del XXI. La cantidad de bases de datos que proporcionan una serie temporal es limitada y, cuando existen, no suelen garantizar una comparación de las distintas fechas con niveles aceptables de incertidumbre. De esta forma, pese a los avances logrados, y pese a la existencia de muchas bases de datos –algunas con numerosas ediciones–, el estudio del cambio de usos y coberturas del suelo a partir de estas fuentes conlleva aún importantes desafíos e incertidumbres para el usuario.

Finalmente, la variedad de categorías LUC incluidas en la mayor parte de las bases de datos es bastante

alta. No obstante, la resolución temática de aquellas con una extensión global es más limitada y se va haciendo cada vez más compleja conforme se reduce la extensión del área cubierta por las bases de datos, hasta llegar a un desarrollo muy detallado en las españolas y, sobre todo, en las de la Comunidad Autónoma andaluza.

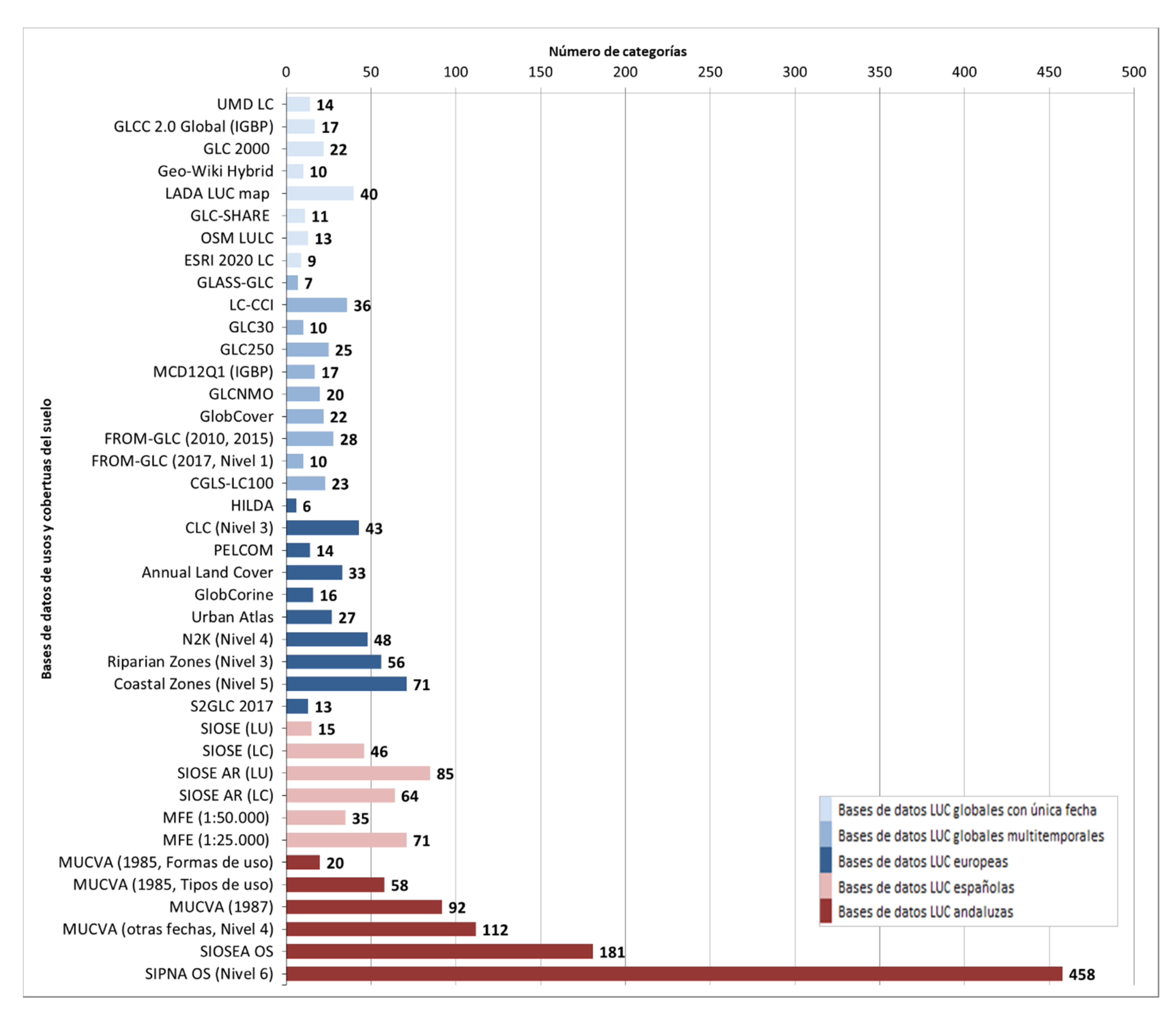


Figura 2. Resolución temática por número de categorías

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha elaborado en el marco del Proyecto "Idoneidad e incertidumbre de los mapas de usos y coberturas del suelo para el análisis y la modelización de dinámicas territoriales" PGC2018-100770-B-100, Proyectos de I+D del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y Fondos FEDER. Los autores también agradecen la financiación de su actividad investigadora al Programa Operativo de Empleo Juvenil, que se desarrolla en el marco del Fondo Social Europeo (FSE), Sistema Nacional de Garantía Juvenil y la Junta de Andalucía; y a las «Ayudas para contratos Juan de la Cierva-formación 2019 [FJC2019-040043]» del Ministerio de Ciencia e Innovación.

5. BIBLIOGRAFÍA

Brown, D.G., Walker, R., Manson, S., Seto, K. (2012): "Modeling Land Use and Land Cover Change". En: M. Abrams, P. Curran, A. Dekker, S.M. de Jong, M. Schaepman (Eds.). *Remote Sensing and Digital Image Processing*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2562-4_23

Castilla, G., Hay, G.J. (2007). Uncertainties in land use data. *Hydrology and Earth System Science*, 11, 1857–1868. https://doi.org/10.5194/hess-11-1857-2007

Cebecauer, T., Hofierka, J. (2008). The consequences of land-cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. *Geomorphology,* 98, 187–198. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.035

Comber, A.J. (2008). The separation of land cover from land use using data primitives. *Journal of Land Use Science*, 3, 215–229. https://doi.org/10.1080/17474230802465173

Equipo Técnico Nacional SIOSE (2020). *Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España de Alta Resolución (SIOSE AR)*. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.

European Environment Agency (2007). CLC2006 technical guidelines. *EEA Technical Report No. 17/2007.* ISSN 1725–2237. https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/techrep89.pdf

European Environment Agency (2021). *Copernicus Land Monitoring Service – Local Component: Coastal Zones Monitoring Nomenclature Guideline*. https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/coastal-zones-nomenclature-and-mapping-guideline.pdf

Fuchs, R. (2015). *A data-driven reconstruction of historic land cover/use change of Europe for the period 1900 to 2010*. PhD thesis.

Fuchs, R., Verburg, P.H., Clevers, J.G.P.W., Herold, M. (2015). The potential of old maps and encyclopaedias for reconstructing historic European land cover/use change. *Applied Geography,* 59, 43–55. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.02.013

Gallardo, M., Martínez-Vega, J. (2016). Three decades of land-use changes in the region of Madrid and how they relate to territorial planning. *European Planning Studies*, 24 (5), 1016-1033. https://doi.org/10.1080/09654313.2016.1139059

García-Álvarez, D., Camacho Olmedo, M.T., Paegelow, M., Mas, J.F. (2022). *Land Use Cover Data and Validation Tools*. Springer Nature. ISBN: eBook: 978-3-030-90998-7

Geoghegan, J. (1998): "'Socializing the Pixel and Pixelizing the Social' in Land-Use and Land-Cover Change". En National Research Council (Ed.), *People and Pixels: Linking Remote Sensing and Social Science* (pp. 51-69). National Academies Press.

Hu, H., Liu, W., Cao, M. (2008). Impact of land use and land cover changes on ecosystem services in Menglun, Xishuangbanna, Southwest China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 146, 147–156. https://doi.org/10.1007/s10661-007-0067-7

Lambin, E.F., Geist, H. (2006). *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Springer, Verlag, Berlin Heidelberg.

Manakos, I., Braun, M. (2014). *Land Use and Land Cover Mapping in Europe: Practices & Trends*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7969-3

Moreira Madueño, J.M. (2007). *Mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía: guía técnica*. Consejería de Medio Ambiente.

Seong, J.C., Usery, E.L. (2001). Assessing raster representation accuracy using a scale factor model. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,* 67 (10), 1185–1191.

Sophie, B., Pierre, D., Eric, V.B., et al. (2011). "Producing global land cover maps consistent over time to respond the needs of the climate modelling community". *2011 6th International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images (Multi-Temp)* (pp 161-164). DOI: 10.1109/Multi-Temp.2011.6005073.

Sulla-Menashe, D., Gray, J.M., Abercrombie, S.P., Friedl, M.A. (2019). Hierarchical mapping of annual global land cover 2001 to present: the MODIS collection 6 land cover product. *Remote Sensing of Environment*, 222, 183–194. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.013.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 97-105

Análisis dinámico de la composición vegetal en formaciones incendiadas y reforestadas, mediante Random Forest y análisis de correspondencia (RF-CA), utilizando series multitemporales Landsat y datos de campo

F. Pérez Cabello, R. Montorio Llovería[2], R. Hoffrén Mansoa, L.A. Longares Aladrén[1]

[1] Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio-Instituto Universitario en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), Universidad de Zaragoza. Ciudad Universitaria, 50.009 Zaragoza.

fcabello@unizar.es, montorio@unizar.es, rhoffren@unizar.es, lalongar@unizar.es

RESUMEN:

Los incendios forestales y la aplicación de medidas de restauración forestal, modifica la composición de la vegetación y condiciona su recuperación en función de las estrategias reproductivas de las especies y de la severidad del fuego. Las colecciones históricas de imágenes como Landsat posibilitan la identificación y seguimiento de dichos cambios. En este trabajo se presenta un estudio empleando *Random Forest* y análisis de correspondencia (RF-CA), para caracterizar los vectores de cambios y las relaciones de interdependencia entre las principales comunidades de una zona del pre-Pirineo oscense que se vio afectada por el fuego en 1994 y fue reforestada durante los años siguientes. Para medir la proximidad entre los diferentes tipos de vegetación en años diferentes, se utilizan las métricas que sintetizan las relaciones/conflictos entre cubiertas en cada píxel. Para ello, las frecuencias absolutas se relativizan mediante los llamados *profiles*, que reflejan la forma en que un tipo de vegetación en un momento cambia de acuerdo a otro. Se consideran dos índices: el de invasión, que representa la relación porcentual entre los píxeles recuperados y el total en la 2ª fecha de esa categoría; y el de maleabilidad, es decir la relación entre los recuperados y el total en la 1ª fecha. Para analizar la independencia y el grado de asociación entre fechas y tipos de vegetación se utilizan, respectivamente, los test de *Chi-square* y Fisher y el coeficiente de *Goodman and Kruskal Gamma*. Los aspectos más significativos son el todavía bajo nivel de asociación que muestran la distribución de las formaciones antes del fuego y 25 años después, y el avance de las formaciones arbustivas derivadas de la degradación de los pinares de *P. sylvestris* y *P. nigra*.

Palabras-clave: Random Forest, incendio forestal, bosque mixto mediterráneo, resiliencia.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, en los ecosistemas forestales mediterráneos, el fuego ha constituido uno de los más importantes agentes modeladores del paisaje debido a sus efectos sobre el complejo suelo-vegetación (Pausas et al., 2008). A corto plazo, el efecto de mayor impacto ecológico-paisajístico es la deshidratación y/o la combustión de la fracción vegetal (Bodi et al., 2012). Sin embargo, en las formaciones mediterráneas, la respuesta de la vegetación suele ser rápida en el tiempo debido a la conservación de las condiciones edáficas y a la intensa profusión de los mecanismos de rebrotación-germinación de la mayoría de las especies vegetales que las componen. En este sentido, el proceso de sucesión secundaria que se produce tras el fuego suele describirse como un restablecimiento de las comunidades afectadas denominado *autosucesión* (Hanes, 1971; Papió, 1994). No obstante, a pesar de la resiliencia de los ecosistemas afectados, contemplada desde la óptica de Holling (1973), las características fisionómicas y la composición florística de la vegetación que coloniza los espacios quemados pueden presentar importantes diferencias en relación a la situación previa, en función de la eficacia de las estrategias anatomo-fisiológicas de las especies dominantes, y de otros factores tales como la intensidad/severidad del fuego, o el tipo de actuaciones de carácter antropogénico que se apliquen, o no, tras el incendio (Francos et al., 2018).

La monitorización de las consecuencias del fuego sobre la vegetación resulta clave para la gestión ra-

cional de la superficie forestal. En las últimas décadas, debido a la gran disponibilidad de datos de teledetección satelital, la medición de los cambios y tendencias en la cubierta vegetal ha sido frecuentemente abordado mediante colecciones de imágenes a diferente resolución espectral y espacio-temporal. Es el caso del archivo Landsat, que está especialmente indicado para el seguimiento de los cambios forestales por la amplitud del periodo que abarca y sus características espacio-espectrales (White et al., 2017; Senf et al., 2020). Junto a la disponibilidad de colecciones históricas de imágenes, se ha extendido la utilización de técnicas de *Machine Learning* (ML), que nos permiten afrontar con cierta facilidad uno de los retos más interesantes en lo que respecta al análisis de los espacios perturbados, el seguimiento en el tiempo de las variaciones en la composición de las formaciones vegetales. De hecho, son numerosos los estudios que han investigado los patrones de recuperación forestal mediante el uso de colecciones de imágenes satelitales y la utilización de estas técnicas (Pérez-Cabello et al., 2021) lo que sin duda está contribuyendo positivamente a la gestión sostenible de los bosques (Gitas et al., 2012).

La resiliencia, desde el punto de vista de la composición de la vegetación, es un elemento central de las prácticas de conservación y gestión de los ecosistemas naturales (Angeler y Allen, 2016), que se presta especialmente al análisis mediante datos de teledetección y ML. Entre las propiedades de la resiliencia ecológica, dos de la más destacadas son la *maleabilidad*, es decir las diferencias con el estado inicial, y la *elasticidad*, o tasa de recuperación del estado inicial tras el cese de la perturbación (Hodgson et al., 2015). En este contexto, el objetivo principal de este trabajo es realizar un seguimiento de la composición de la vegetación y, por ende, de la resiliencia, en una zona afectada por un incendio en 1994. Además, esta zona fue posteriormente sometida a un proceso de reforestación vegetal, lo que representa un doble factor de alteración, fuego-reforestación. El análisis se basa en la generación, mediante ML, de productos cartográficos anuales de diferentes tipos de cubiertas y formaciones vegetales, y la caracterización de los vectores de cambio de mayor relevancia espacial mediante la aplicación de análisis de correspondencias (CA) y su caracterización mediante datos de campo. Este último extremo es especialmente relevante, debido a la complejidad de los modelos de regeneración en entidades ecológicas doblemente alteradas. El análisis permitirá la medición del grado en el que las formaciones vegetales y su distribución difiere del patrón anterior al doble impacto en relación con factores endógenos (tipo de formación y estrategia reproductiva de las especies principales afectadas). Ello permitirá evaluar de manera operativa la maleabilidad-elasticidad, i.e., el grado en que el nuevo estado estacionario difiere del original y la rapidez de la recomposición de la situación anterior. Esta propuesta metodológica, que se inscribe en un marco de actuación a nivel de gestión forestal, se enmarca en los estudios de análisis de cambios bajo una doble perspectiva temporal, continua y diacrónica.

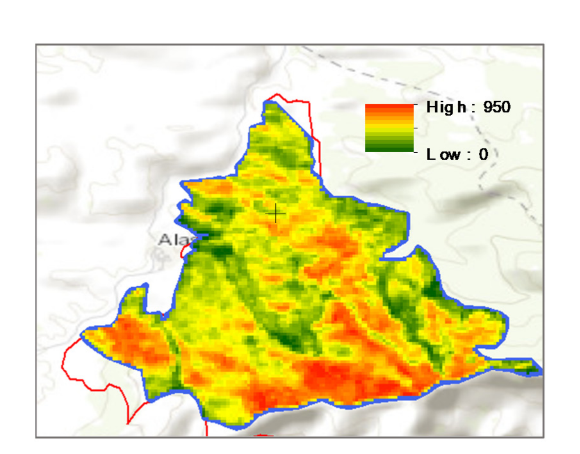
2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio se sitúa en el extremo occidental de la Sierra de San Juan de la Peña (Prepirineo Oscense) (Figura 1), donde tuvo lugar un incendio forestal en 1994. El incendio fue detectado por un vigilante fijo a las 15:30 del 21 de agosto de 1994, quedando controlado el día 25. Según las fuentes oficiales, la superficie arbolada quemada fue de 1.309 has (*Pinus sylvestris* -741 ha-, *Pinus nigra* -205 has- *Quercus* gr. *cerroides* -240 ha-) y la desarbolada de 587 has, dentro de los términos municipales de Bailo (1.528 ha), Jaca (60 ha) y Las Peñas de Riglos (372 ha). En cuanto a los niveles de severidad registrados, a partir de los resultados cartográficos derivados de la aproximación bitemporal del *Normalized Burn Ratio* (ΔNBR) (Key y Benson, 2006), el incendio pudo calificarse de severidad moderada-alta, presentando importantes zonas con registros de moderada-baja ($\overline{X}$=490), especialmente en el sector oriental, coincidiendo con la zona de mayor humedad y concentración de frondosas en el Bco. del Real (Figura 1), y en las inmediaciones al núcleo de Alastuey. Inmediatamente después del incendio, en el sector correspondiente a la superficie del MUP H0206 "Monte Alto" –Entidad local Alastuey (Bailo), se iniciaron las labores de extracción de la madera quemada que concluyeron en 1997. En 1998 se inició la preparación del terreno para la repoblación, mediante la técnica de subsolado intermitente siguiendo líneas de máxima pendiente con una densidad de 1600 hoyos/ha. El subsolado se realizó con un tracto-oruga equipado con dos rejones que penetran 70 cm en el suelo.

El clima de la zona es de tipo submediterráneo subhúmedo (Cfb según Köppen). La precipitación media anual es de unos 850 mm. Presenta un régimen pluviométrico equinoccial con máximos principales en primavera y un cierto déficit hídrico en el verano que frecuentemente queda interrumpido por fenómenos tormentosos. La temperatura media es de 11 °C. Bioclimáticamente se sitúa en el dominio potencial de los quejigales basófilos montanos en el piso montano inferior. Sin embargo, la vegetación antes del fuego, estaba constituida predominantemente por masas de diferente edad de *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra* y comunidades

de quercíneas marcescentes; en ambos casos con un sotobosque compuesto por *Buxus sempervirens* y herbáceas (*Festuca sp.*, *Brachypodium* sp.), como especies más abundantes. Desde el punto de vista edáfico, sobre los depósitos de ladera, asentados sobre estratos alternantes de areniscas y lutitas eo-oligocenas, se reconocen cambisoles eutricos y calcáricos, bien drenados y estructurados, con espesores en torno a 75-100 cm.



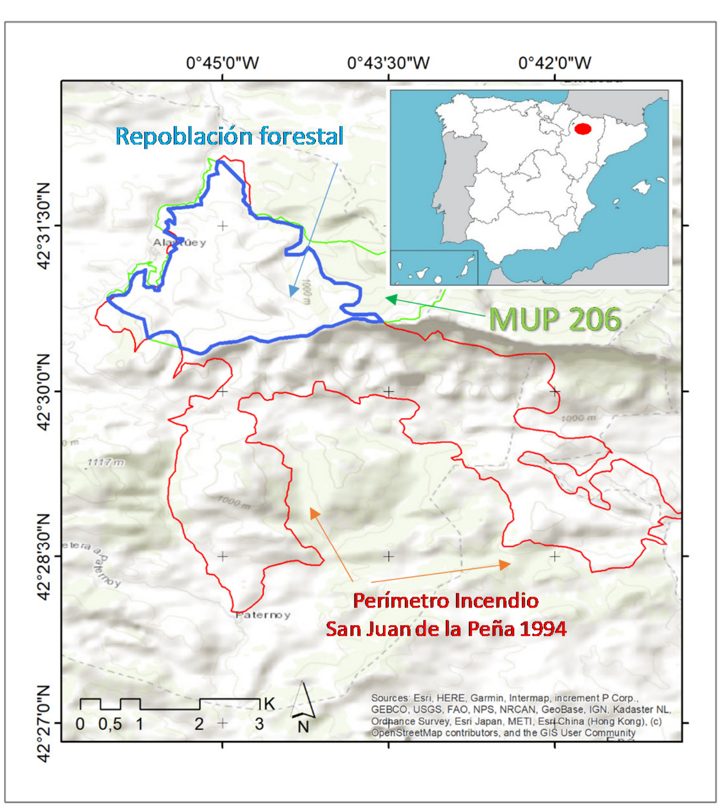


Figura 1. Área de estudio. Incendio de San Juan de la Peña (Monte de Utilidad Pública 206). A la izquierda, distribución de los niveles de severidad (ΔNBR).

2.2. Tratamiento de las imágenes de satélite y datos de campo

El estudio se basa en la generación y análisis de productos cartográficos de carácter anual (a lo largo del periodo comprendido entre 1986-2020), referidos a la distribución espacial de formaciones vegetales. Para ello, se emplearon imágenes satelitales multiespectrales del Programa Landsat 5/7 disponibles en el repositorio de la plataforma *Google Earth Engine* (GEE) con el nivel de procesamiento Level 2 (Collection 2) ('LANDSAT/LT05/C02/T1_L2' y 'LANDSAT/LE07/C02/T1_L2'). El programa Landsat gestionado por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y el USGS (*United States Geological Service*), proporciona observaciones globales con una resolución espacial de 30 m cada 16 días. Para cada año (33 años en total, dos años no se consideraron –1994 y 1992), se extrae un compuesto, derivado de la mediana de los valores de reflectividad superficial -SR- (del inglés *surface reflectance*) correspondientes a las imágenes disponibles entre junio y octubre de cada año, filtradas con una máscara de nubes (CFMask).

Posteriormente en *Google Earth Engine* (GEE) se utiliza el algoritmo de clasificación supervisada basada en *Random Forest* (RL), utilizando 500 árboles y 4 ramificaciones -la raíz cuadrada del número de clases objetivo (Belgiu and Drăgu, 2016; Dash et al., 2018). El proceso de entrenamiento consiste en el diseño de una leyenda de formaciones vegetales que integran diferentes fases del proceso de regeneración vegetal en función de las especies principales de las comunidades afectadas, seleccionando puntos de entrenamiento en zonas no afectadas por incendios en los últimos 50 años y zonas afectadas antes de 1994, año del incendio. Los puntos de entrenamiento se han identificado a partir de una base de datos de campo (2013), elaborada en el marco del proyecto de investigación GA-LC-042/2011 (Caixa-DGA), y diferentes recursos cartográficos de información forestal. En concreto, el 2º Inventario Forestal Nacional (IFN-2), se utilizó para identificar el tipo de vegetación en las superficies quemadas con anterioridad a 1990 (los trabajos de campo del IFN-2 se

concentran durante 1993-1994) y el Mapa Forestal de España (MFE400). La leyenda final incluye un total de ocho categorías repartidas en cuatro formaciones arbóreas (*Pinus sylvestris* L. (Ps), *Pinus nigra* J.F. Arnold (Pn), *Quercus ilex* L. (Qi), *Quercus* gr. *cerrioides* Willk. & Costa (Qf)), tres de carácter arbustivo-subarbustivo (matorrales derivados de *P. sylvestris* (mPs*)*, matorrales derivados de *Q. cerrioides* (mQf), y matorrales subarbustivos degradados (mP)) y una categoría representativa de las zonas de escasa o nula vegetación (I). En el caso de los matorrales, en lugar de utilizar puntos de calibración identificados por la especie principal, se identifican localizaciones que representen la firma espectral de formaciones secundarias de las especies arbóreas anteriormente citadas, utilizando como referencia la vegetación previa al periodo de perímetros de incendios disponible apoyándonos en el Mapa Forestal de España (MFE400).

El diagnóstico en campo se realizó mediante el análisis de la composición florística y la fisionomía de los estratos que conforman cada comunidad, utilizando la base de datos de campo (2013) elaborada en el marco del proyecto GA-LC-042/2011 (Caixa-DGA). Los inventarios florísticos, realizados en la primavera de 2013, se confeccionaron computando la proporción del terreno ocupado por la proyección perpendicular de las partes aéreas de los individuos de cada una de las especies y de los estratos considerados de cada especie, adaptando la metodología de Braun-Blanquet (1979) según Pérez-Cabello et al. (2010).

2.3. Tratamiento estadístico

Para analizar los cambios derivados de las interacciones fuego-reforestación sobre la composición de la vegetación en el incendio de San Juan de la Peña (SP) y su distribución espacial, se adapta un recurso estadístico clásico, las matrices de confusión y los análisis de correspondencia -CA- (del inglés *Correspondence Analysis*), en donde se recogen las correspondencias entre la distribución de los tipos de vegetación asociados a dos momentos concretos en el tiempo: la situación prefuego (columnas) y la posfuego (filas).

Para obtener el compuesto prefuego y minimizar los errores de asignación y las fuentes de ruido en el proceso de clasificación (RF), se aplicó un parámetro de centralidad a los productos cartográficos anuales anteriores a la fecha de fuego (1989-1993), sintetizándose en una única cartografía que recoge la categoría más repetida en el periodo de tiempo disponible previo al fuego. Mientras, para el posfuego, se contemplan dos perspectivas temporales distintas: diacrónica y continua. Para la primera se aplica el mismo parámetro de centralidad, pero considerando las imágenes del cuarto quinquenio tras el fuego (2010-2014) (coincidente con el trabajo de campo). Para la segunda, se realiza un análisis continuo año por año, i.e., se compara el compuesto prefuego con cada año posterior al incendio forestal. En ambos casos, la diagonal de las matrices, confeccionadas a partir de las clasificaciones diacrónicas, recogerá el número de píxeles recuperados tras la perturbación compleja (aquellos que presentan la misma categoría de vegetación). Por su parte, los marginales o residuales documentarán qué categorías de vegetación reemplazan a las prefuego (columnas) y sobre cuáles se proyectan espacialmente (filas).

Para medir la proximidad entre los diferentes tipos de vegetación en años diferentes, se utilizan las métricas de exactitud-precisión (Strahler et al., 2006), que sintetizan las relaciones/conflictos entre cubiertas en cada píxel. Para ello, las frecuencias absolutas se relativizan mediante los llamados *profiles* (frecuencias dividido por el total), que reflejan la forma en que un tipo de vegetación en un momento cambia de acuerdo a otro. Se proponen dos índices: el de *invasión*, que representa la relación porcentual entre los píxeles recuperados y el total en la 2ª fecha de esa categoría; y el índice que denominaremos de *maleabilidad*, es decir la relación entre los recuperados y el total en la 1ª fecha de esa categoría. Para analizar la independencia y el grado de asociación entre filas y columnas se utilizan, respectivamente, los test de *Chi-square-Fisher*, y el coeficiente de *Goodman and Kruskal Gamma*. Asimismo, para el análisis de las tendencias y la magnitud de la pendiente, se utiliza la prueba no paramétrica de *Mann-Kendall* y el test de *Sen*.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Productos cartográficos mediante Random Forest

En el proceso de clasificación RF se utilizaron como variables predictivas los valores de reflectividad correspondientes a las bandas del óptico, la temperatura de superficie y variables hipso-morfo-topográficas (iluminación y altura topográfica) derivadas del modelo digital de elevaciones de la *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), disponible en el repositorio de GEE. Estas últimas variables se incluyeron debido a los condicionamientos en los patrones de distribución espacial relacionados con el dimorfismo topo-secuencial y la zonificación altitudinal de la vegetación, características de la montaña media submediterránea del Prepirineo aragonés. Los valores más robustos se obtuvieron entrenando sobre el compuesto de 1989 (0,78)

y los principales problemas de confusión espectral se identificaron entre en los matorrales con los pinares de *P. sylvestris*. Las clasificaciones para los restantes años no se validaron individualmente, excepto en 2013, año en el que se extrajeron los datos de campo para el entrenamiento (0.72).

3.2. Perspectiva diacrónica. Distribución de las formaciones vegetales: prefuego y posfuego

La distribución de las formaciones vegetales antes del fuego, generada a partir del compuesto prefuego, se presenta en la Figura 2 y Tabla 1. Los pinares de *P. sylvestris*, así como los matorrales representativos de su serie de degradación (mPs), son las formaciones predominantes que se vieron afectadas por el incendio de 1994. Le siguen, con proporciones más discretas (≈10 %), los pinares de laricio (Pn) y quejigares de *Q*. gr. *cerrioides* (Qf). Ya en un tercer nivel encontramos categorías como los encinares y las series de degradación de Qi y Pn, así como las zonas desprovistas mayoritariamente de vegetación.

Veinte años tras el fuego y, como resultado de las interacciones entre sus efectos y el proceso de repoblación posterior, se aprecia como mPs y los Ps siguen siendo las formaciones predominantes, aunque observando cambios sustanciales en términos relativos: fuerte incremento de mPs y decremento de Ps. Otros de los aspectos destacados de la nueva configuración es el incremento que experimentan las categorías mQf y mP, es decir, los matorrales de degradación de los quejigares y las formaciones subarbustivas derivadas de los pinares. También cabe resaltar el mantenimiento, al menos en términos porcentuales, de la superficie de Qf y de la superficie con escaso recubrimiento vegetal. En este sentido, en la Figura 3 se recoge algunos ejemplos de los productos cartográficos derivados del proceso de clasificación RF (Figura 3) que dan muestra de los cambios derivados de las fases de del proceso de repoblación forestal, debido a los niveles de severidad y al propio proceso de regeneración natural. Además, también se observan algunos cambios más difíciles de comprender mesológicamente, como la desaparición de las manchas de Qf en 2002, probablemente ligados a las limitaciones del proceso de clasificación o la inestabilidad de estos ecosistemas –doblemente perturbados.

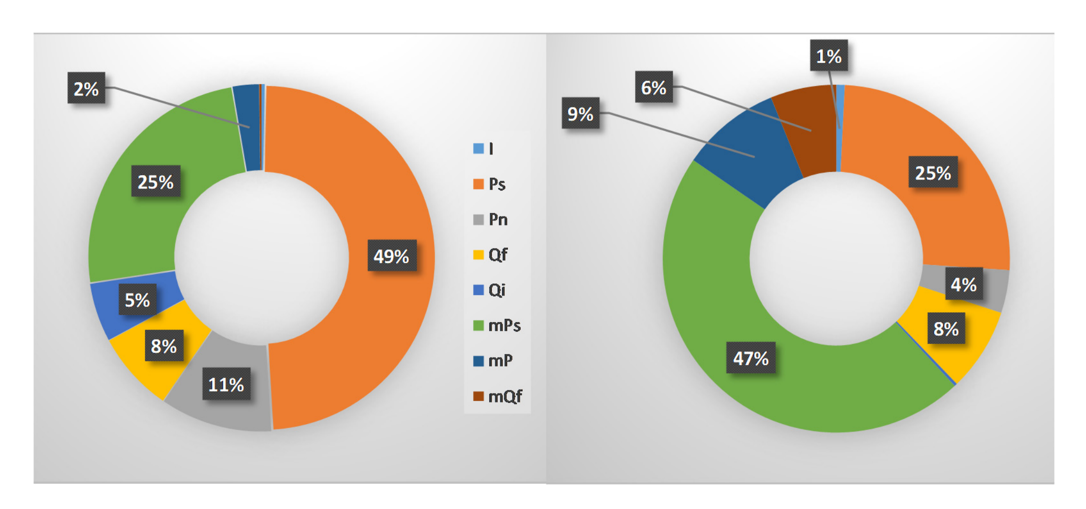


Figura 2. Distribución prefuego (izda.) y posfuego (≈ 20 años después) (drcha.)

Para analizar las relaciones de competencia por el espacio se utilizan los perfiles derivados de la matriz de contingencia, considerando las frecuencias en los dos compuestos temporales (pre-fuego y posfuego). Recordemos que el índice de maleabilidad identifica la capacidad de una formación vegetal en reinstalarse en su misma localización tras la perturbación (i.e., la relación entre el número de caso en los que coinciden el tipo de formación (diagonal) y la frecuencia total de esa formación antes de la perturbación); frecuentemente este indicador se mide como el porcentaje de semejanza respecto del estado inicial (Westman, 1986). En este sentido, las formaciones arbustivas son las más maleables por su estrategia adaptativa y por necesitar menos tiempo para recomponerse tras el fuego. Le siguen Ps aunque en menor medida (≈ 0,6), debido en este caso al (1) bajo nivel de severidad con el que se vio afectado esta comunidad en el sector oriental del área de estudio (Figura 1); (2) al hecho de que se dejaran numerosas islas de Ps exentas del proceso de extracción de madera, como estrategia para activar la regeneración vegetal; y (3) a que fue la especie mayoritariamente seleccionada para la repoblación.

Tabla 1. Tabla de contingencia entre quinquenios. *Prefuego* = quinquenio previo al fuego (1993-1989; *Posfuego*

= quinquenio posterior al incendio y a la reforestación (2010-2014).

		Prefuego								
		I	*Ps*	*Pn*	*Qf*	*Qi*	*mPs*	*mP*	*mQf*	**Total**
Posfuego	*I*	0,091	0,000	0,078	0,000	0,000	0,601	0,013	0,000	**0,783**
	Ps	0,000	23,218	0,392	0,953	0,509	0,183	0,013	0,000	**25,268**
	Pn	0,065	0,914	2,181	0,144	0,118	0,575	0,000	0,000	**3,996**
	Qf	0,000	2,350	0,562	1,802	2,729	0,300	0,000	0,000	**7,744**
	Qi	0,000	0,196	0,000	0,000	0,065	0,000	0,000	0,000	**0,261**
	mPs	0,039	21,350	4,988	2,520	1,293	16,271	0,065	0,000	**46,527**
	mP	0,104	0,170	1,188	0,757	0,261	4,427	2,259	0,104	**9,271**
	mQf	0,000	0,548	1,149	1,371	0,522	2,311	0,131	0,104	**6,137**
	Total	**0,300**	**48,746**	**10,538**	**7,548**	**5,498**	**24,680**	**2,481**	**0,209**	

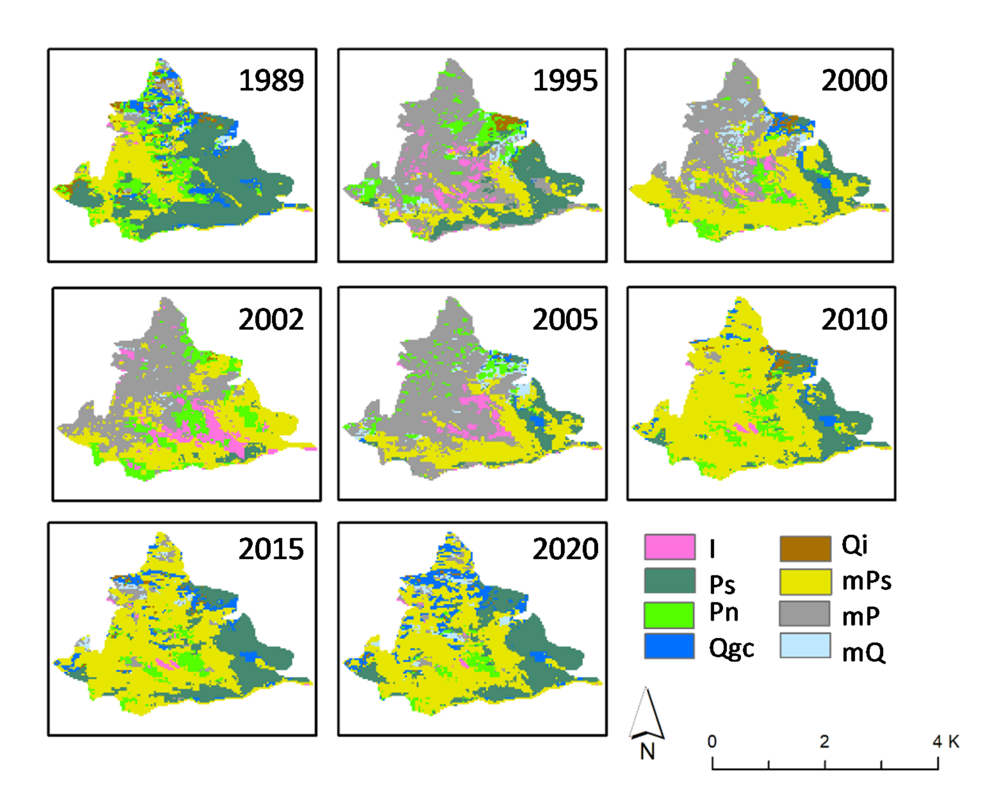


Figura 3. Productos cartográficos de la distribución de las formaciones vegetales (diferentes años a lo largo del periodo de estudio).

Al mismo tiempo, también podemos obtener la capacidad de las formaciones vegetales de ocupar espacios diferentes a los que cubrían antes del fuego, la capacidad invasiva (i.e., la relación entre los restituidos y el total en el segundo momento) (Figura 4). Mientras que los pinares de Ps y Pn son las menos invasivas, se trata de especies representativas de resistencia pasiva -mecanismos destinados a soportar el fuego mediante la disposición y protección de los órganos y tejidos vitales- sin propiedades serótinas, el resto mantiene guarismos similares, aunque sobresaliendo ligeramente los matorrales de Qf. El principal vector de cambio en términos de superficie está protagonizado por el paso de la superficie de Ps y su transformación a matorrales de PS con un 21% de la superficie total, lo que explica el decremento de la superficie de esta formación del 49% al 25%. Desde el punto de vista de la composición florística, las nuevas formaciones que colonizan los espacios quemados de *Pinus sylvestris* están compuestas por herbáceas perennes entre las que destacan

algunos hemicriptófitos como *Brachypodium ramosum* y *Aphyllanthes monspeliensis*; caméfitos y nanofaneróﬁtos tales como *Buxus sempervirens*, *Genista* scorpius y *Echinospartum* horridum; y algunos fanerófitos pertenecientes a las rosáceas como *Rubus ulmifolius*, *Rosa canina*, *Rosa arvensis*.

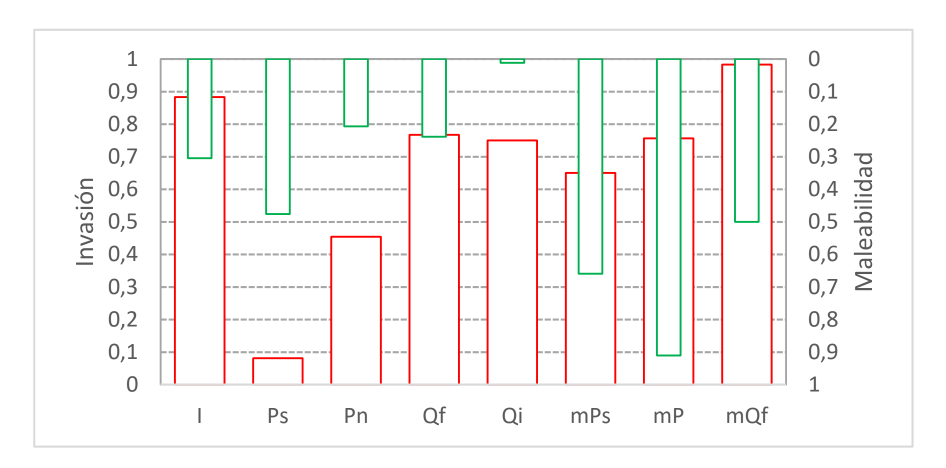


Figura 4. Distribución de los índices de *invasión* (rojo) y *maleabilidad* (verde) por formaciones vegetales.

3.3. Evolución multitemporal del grado de asociación en relación a la situación previa (prefuego)

La Figura 5 representa la evolución del grado de asociación entre el compuesto prefuego y cada uno de los posteriores a 1994 considerados individualmente, cuantificado mediante el coeficiente *Goodman and Kruskal Gamma*. El alto grado de asociación entre los productos cartográficos antes del fuego, experimentan un fuerte descenso un año después. Tras un incremento dos años después (1996), el grado de asociación entre la situación previa y la correspondiente a cada año, se instala en torno a 0.5-0.6, observándose una tendencia positiva significativa (*P-value* >0.05) en el tiempo, aunque de escasa magnitud (Sen's slope = 0,0048) (≈ 0,5% anual), sólo interrumpida coyunturalmente en 2002, momento en el que se recoge un descenso significativo coincidiendo con el final del proceso de plantación. A partir de esta modelización, en función de la evolución de los coeficientes de Goodman y Kruskal Gamma, se prevé un restablecimiento a muy largo plazo, lo que evidencia la escasa elasticidad de la entidad ecológica, a pesar de la reforestación mediante *P. sylvestris.*

4. CONCLUSIONES

La aplicación de RF sobre las colecciones Landsat C2-L2, a lo largo de un extenso periodo de tiempo (≈30 años) en una entidad ecológica que muestra una doble perturbación, ha permitido analizar la distribución espacial de las principales formaciones vegetales que colonizan un monte de utilidad pública incendiado en 1994 y reforestado posteriormente con *P. sylvestris*. La doble estrategia de comparación que se contempla en este trabajo: comparación entre compuestos quinquenales y entre el compuesto quinquenal “prefuego” y cada año de manera consecutiva, ha permitido, respectivamente, (1) entender el sentido de los cambios de las formaciones vegetales que conforman la entidad ecológica a través de los índices de maleabilidad e invasión; y (2) conocer la evolución del grado de asociación de los modelos de distribución espacial en términos de elasticidad. El aspecto más significativo reside en el todavía nivel medio-bajo de asociación entre la distribución de las formaciones antes del fuego y 25 años tras el incendio. Es decir, se trata de una entidad ecológica transformada poco resiliente en términos de elasticidad, formada por comunidades vegetales con diferente grado de maleabilidad debido a las también diferentes estrategias reproductivas de las especies principales originales. La maleabilidad de los Ps en algunos sectores, se explica por la baja severidad registrada y por la introducción de esta especie de manera artificial. Sin embargo, es más significativa su degradación hacia matorrales, como se ha demostrado y caracterizado mediante datos de campo.

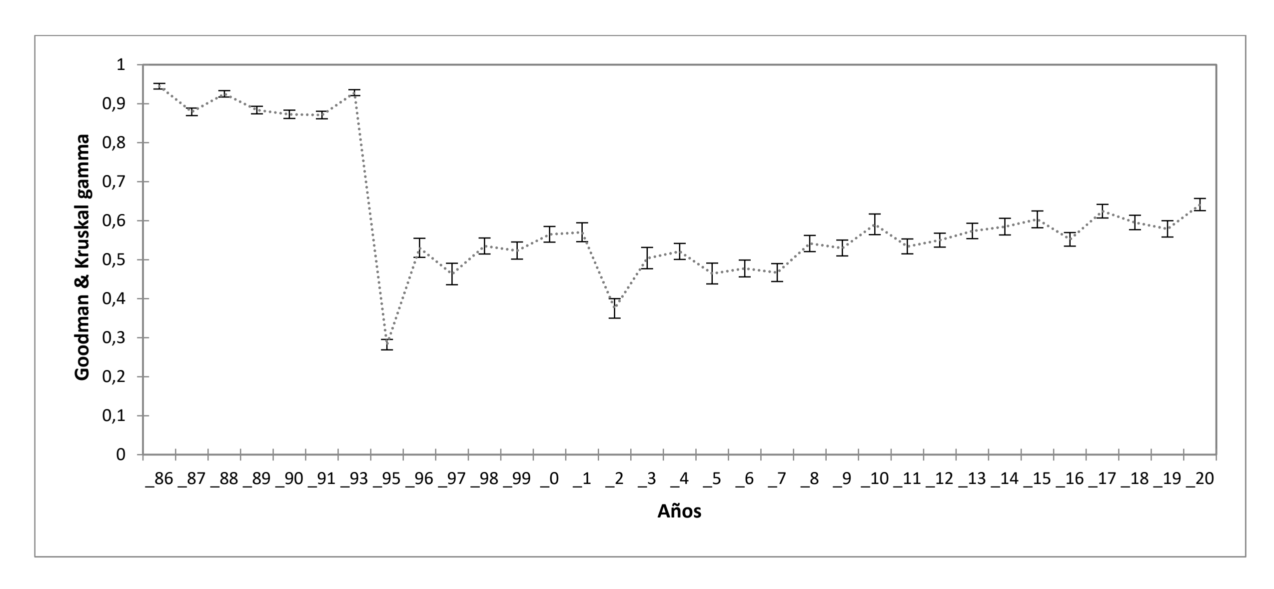


Figura 5. Evolución del grado de asociación entre el compuesto prefuego y los años posteriores a 1994.

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación se ha realizado en el contexto del proyecto de I+D+i Retos Investigación: PID2020-118886RB-I00 "Análisis dinámico de la Resiliencia de los Paisajes Forestales afectados por el fuego (PaF) mediante indicadores espectrales multisensor", financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación / Agencia Estatal de Investigación (10.13039/501100011033).

5. BIBLIOGRAFÍA

Angeler, D.G., Allen, C.R. (2016). Quantifying resilience. *Journal of Applied Ecology,* 53, 617–624. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12649.

Belgiu, M., Dragut, L. (2016). Random Forest in Remote Sensing: A Review of Applications and Future Directions*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24-31. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011

Bodi M., Cerdà A., Mataix-Solera J., Doerr S.H. (2012). Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: revisión bibliográfica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles,* 12, 33-55. https://doi.org/10.21138/bage.2058.

Braun-Blanquet, J. (1979). *Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales*. H. Blume Ed., Madrid.

Dash, J.P., Pearse, G.D., Watt, M.S. (2018). UAV multispectral imagery can complement satellite data for monitoring forest health. *Remote Sensing*, 10(8), 1-22. https://doi.org/10.3390/rs10081216

Francos, M., Pereira, P., Alcañiz, M., Úbeda, X. (2018). Long-term impact of wildfire on soils exposed to different fire severities. A case study in Cadiretes Massif (NE Iberian Peninsula). *Science of the Total Environment,* 615, 664-671. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.311

Gitas, I., Mitri, G., Veraverbeke S., Polychronaki, A. (2012). Advances in Remote Sensing of Post-Fire Vegetation Recovery Monitoring - A Review. *Remote Sensing of Biomass - Principles and Applications*. https://doi.org/10.5772/20571.

Hanes T.L. (1971). Succession after fire in the chaparral of Southern California. *Ecological Monographs*, 41(1), 27–52. https://doi.org/10.2307/1942434

Hodgson, D., McDonald, J. L., Hosken, D. J. (2015). What do you mean, "resilient"? *Trends in Ecology and Evolution*, *30*(9), 503–506. https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.010

Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics,* 4, 1-23. https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245

Key, C.H., Benson, N.C., (2006). "Landscape Assessment (LA), FIREMON: fire effects monitoring and inventory system". En Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins. https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-164

Papió, C. (1994). *Ecologia del foc i regeneració en garrigues i pinedes mediterrànies*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans (Secció de Ciències Biològiques). 292 pàg.

Pausas, J.G., Llovet, J., Rodrigo, A., Vallejo, V.R. (2008). Are Wildfires a Disaster in the Mediterranean Basin? A Review. *International Journal of Wildland Fire*, 17, 713-723. http://doi.org/10.1071/WF07151

Pérez-Cabello, F., Ibarra, P., Echeverría, M.T., de la Riva, J. (2010). Post-fire land degradation *of Pinus sylvestris* L. woodlands after 14 years. *Land Degradation and Development*, 21(2), 145–160. https://doi.org/10.1002/ldr.925

Pérez-Cabello, F., Montorio Llovería, R. (2021). Remote sensing techniques to assess post-fire vegetationrecovery. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 21:100251. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100251

Senf, C. Laštovička, J., Okujeni, A., Heurich, M., Van der Linden, S. (2020). A generalized regression-based unmixing model for mapping forest cover fractions throughout three decades of Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111691. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111691

Strahler, A.H., Boschetti, L., Foody, G.M., Friedl, M.A., Hansen, M.C., Herold, M. and Woodcock, C.E. (2006). Global land cover validation: Recommendations for evaluation and accuracy assessment of global land cover maps. *European Communities, Luxembourg*, *51*(4), 1-60.

Westman, W.E. and O'Leary, J.F. (1986). Measures of resilience: the response of coastal sage scrub to fire. *Vegetatio*, 65, 179-189.

White, J.C., Wulder, M.A., Hermosilla, T., Coops, N.C., Hobart G.W. (2017). A nationwide annual characterization of 25 years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series. *Remote Sensing and Environmental*, 194, 303-321, https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111691



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 106-115

Uso de imágenes Sentinel 2 para la monitorización agroambiental de cultivos subtropicales utilizando Machine Learning e Índices de Vegetación

P. Quesada-Molina[1], F.B. Galacho-Jiménez[2], F.J. Lima-Cueto[3], D. Gumiel-Muñoz[4]

[1] *Cátedra de Recursos Geotecnológicos, Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, s/n. 29.071 Málaga.*
[2] *Grupo de Investigación Análisis Geográfico, Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, s/n .29.071 Málaga.*
[3] *Grupo de Investigación Análisis Geográfico, Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, s/n .29.071 Málaga.*
[4] *Cátedra de Recursos Geotecnológicos, Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, s/n. 29.071 Málaga.*

quesada@agron.app, fbgalacho@uma.es, lima@uma.es, gumiel@agron.app.

RESUMEN: La expansión excesiva de los cultivos subtropicales, especialmente aguacate y mango, en ambientes semiáridos mediterráneos, como es el caso de la provincia de Málaga, se consolida como un importante problema ambiental. Su rápida y amplia expansión, unida a una alta demanda hídrica condiciona la sostenibilidad del agrosistema y su misma productividad. En este trabajo se muestra una propuesta metodológica basada en instrumentos remotos que permitan evaluar el estado de los cultivos y su relación con los recursos hídricos. Para ello se emplean imágenes multiespectrales de Sentinel 2, las cuales han ganado recientemente una atención significativa de investigadores y profesionales como un recurso rentable y útil para las aplicaciones agroambientales. Por otra parte, los algoritmos de Machine Learning aplicados a los datos de teledetección permiten hacer una mejor selección de las imágenes y mejorar la capacidad de procesamiento, concretamente en este tipo de aplicaciones. El trabajo se completa con un análisis estadístico basado en una selección del estado de los cultivos analizados en base al objetivo de este trabajo. Como resultado dispondremos de un proceso metodológico para procesar las imágenes disponibles Sentinel 2mediante una serie de herramientas que permitirán obtener mapas del estado hídrico y del desarrollo vegetativo de estos cultivos. Con ello se podrán optimizar las acciones de control y gestiones agrícolas en un periodo de tiempo relativamente corto.

Palabras-clave: teledetección, Machine Learning, índices de vegetación, cultivos subtropicales.

1. INTRODUCIÓN

Las soluciones tecnológicas actuales se deben acercar a los agricultores ya que pueden ayudarles en la toma decisiones basadas en datos que mejoren no sólo la producción de los cultivos subtropicales, sino también la gestión sostenible de los recursos que son necesarios para mantener dicha producción, fundamentalmente agua y suelo. En la actualidad venimos observando sobre el terreno la inadecuación de los elementos del proceso productivo con las condiciones de dichos recursos y así queda constatado en una abundante literatura científica. La importancia de este desajuste se acrecienta en un contexto de cambio climático, cuyas consecuencias cada día son más evidentes y que, en este caso, redundan en una menor disponibilidad de recursos hídricos y en un incremento de la pérdida de suelos por erosión. Todo ello debido a la escasez e irregularidad de las precipitaciones y a las condiciones en las que se desarrollan las prácticas agrícolas actualmente.

Entendemos que los investigadores debemos aportar soluciones y hacer llegar a los agricultores la tecnología y las herramientas necesarias para gestionar eficientemente sus cultivos, si bien con la intención de obtener los mejores rendimientos y rentabilidad, pero también para hacer frente al cambio climático que ya está afectando al sector agrícola.

Dada la amplitud de este tema vamos a centrar nuestro análisis en proponer un procedimiento para aunar una serie de fuentes de imágenes multiespectrales como la que se pueden obtener de las misiones Sentinel 2 (S2) del programa Copernicus y aplicar una serie de técnicas de teledetección para su manejo como son los índices de vegetación. Así pues, el objetivo principal de este trabajo es avanzar en el monitoreo de este tipo de cultivos. Utilizando imágenes de satélites y combinando esa información con otras disponibles

actualmente como los datos meteorológicos mediante estaciones de campo pueden generarse análisis avanzados del estado de los cultivos. Fundamentalmente, con la finalidad de gestionar eficientemente los recursos necesarios para la producción agrícola.

Existe un amplio desarrollo de distintas líneas de investigación en esta temática. Desde el punto de vista geográfico, la línea que despierta más interés no sólo es el estudio de la extensión de los cultivos en el territorio, o sus consecuencias en el medio ambiente, sino también cómo aplicar las técnicas de teledetección a la monitorización de cultivos y concretamente a la gestión eficiente de las condiciones del cultivo mediante el uso de agricultura de precisión (Duan et al., 2017; Vanegas et al., 2018).

También, en este caso, es fundamental conocer el comportamiento variable de los cultivos subtropicales en las fincas agrícolas y medir su evolución a lo largo del tiempo para intentar ser eficientes desde el punto de vista de la aplicación de insumos, de manera que se ahorre en recursos, buscando no solo un ahorro económico, sino también una mayor racionalidad en el gasto de agua para riego. Son muchas las experiencias y aplicaciones que utilizan productos de diferentes sensores remotos para el análisis de cultivos variados (Cheng et al., 2015; Jiang et al., 2021)

El uso de la teledetección para generar información agronómica puede provenir de datos de recogidos a distintas escalas. Es precisamente el juego de escalas lo que, hasta el día de hoy, ha permitido ajustar el diagnóstico de lo que ocurre en una explotación agrícola. Sin embargo, con la mejora en los sistemas de teledetección, puede bastar una única escala para ser capaces de dilucidar parámetros básicos como la heterogeneidad del cultivo, detectar problemas de manera precoz o determinar sus posibles necesidades hídricas (Haghverdi et al., 2019; Maneta et al., 2020; Marković et al., 2021). No obstante, otras escalas no son descartables y son de interés para este tipo de estudios como completar con información de sensores instalados en suelo o con UAVs que recogen datos complementarios muy ajustados a puntos concretos de las fincas, cuando sea necesario (Capstaff et al., 2021).

Diversos estudios utilizan datos de Sentinel 2 para la estimación remota del contenido de clorofila y nitrógeno en cultivos utilizando las bandas red-edge de Sentinel-2 y -3 (Clevers y Gitelsonb, 2013). Otros estudios lo han utilizado, para evaluar el estado de la biomasa de los cultivos (Tian et al., 2019; He et al., 2021)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Selección del ámbito de estudio

Nuestro ámbito de aplicación se concreta a un espacio geográfico característico del cultivo de subtropicales en la costa mediterránea española: la costa oriental de la provincia de Málaga. Situada en el sur de España es la denominada comarca de la Axarquía. Dado que la superficie abarcable es muy amplia y heterogénea proponemos un área de experimentación más reducida y también más homogénea. De este modo, la superficie de la investigación se concreta en 1.317,70 has situadas en la Cuenca del Río Vélez, ocupando parte de los municipios de Benamocarra y Vélez Málaga. En dicha zona quedan recogidas unas 400 fincas aproximadamente con una superficie media de 3,22 Ha. La edad media del cultivo en dicha superficie es de 9 años, siendo de 6 años las plantaciones más jóvenes y de 20 años, las más antiguas. En su mayor parte, árboles en producción y suficientemente maduros para el objeto de estudio, sobre todo por el desarrollo de su masa foliar. Los marcos de plantación empleados van desde el tradicional con medidas de 8 m x 8 m a 7 m x 8 m, a marcos más reducidos en explotaciones más jóvenes, principalmente de carácter intensivo: 4 m x 4 m; 4 m x 1,5 m; 3 m x 3 m; 3 m x 1,5 m y 2 m x 1,5 m.

Se trata de una zona típica de clima mediterráneo semi-árido, donde predomina un clima mediterráneo subtropical con una temperatura media anual de 17,4°C y una máxima de 28°C, junto con unas precipitaciones anuales medias de 576 mm. Estas condiciones climáticas son propicias para el cultivo de subtropicales, ya que estos requieren de temperaturas comprendidas entre 10° y 30°C. Fuera de dicho rango, el rendimiento potencial del cultivo disminuye considerablemente. 2.2. Obtención de las imágenes

En el presente estudio se decidió utilizar la plataforma de Google Earth Engine (GEE). Esta plataforma combina un catálogo de múltiples petabytes de imágenes satelitales y conjuntos de datos geoespaciales con capacidades de análisis a escala planetaria (Bunting et al., 2019*;* Jin et al., 2019; Li et al., 2021).

Nosotros haremos uso de imágenes de la familia Sentinel. Como se sabe, Sentinel 2 consta de 2 satélites activos actualmente. Estos satélites, gracias a su sensor óptico multiespectral, proveen imágenes con alta resolución espacial: 10 m, 20 m y 60 m; información multiespectral con 13 bandas en las partes VNIR y SWIR del espectro, y un amplio campo de visión: 290 km, véase para más detalle la Tabla 1).

Tabla 1. Bandas espectrales para los sensores Sentinel-2. Fuente: Radiometría y bandas espectrales del sensor S2 de la Agencia Espacial Europea (ESA). Available online: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/radiometric (accessed on: 16/02/2022).

Sentinel-2 bands	*Sentinel-2A*		*Sentinel-2B*		*Spatial resolution (m)*
	Central wavelength (nm)	*Bandwidth (nm)*	*Central wavelength (nm)*	*Bandwidth (nm)*	
Band 1 – Coastal aerosol	442.7	21	442.2	21	60
Band 2 – Blue	492.4	66	492.1	66	10
Band 3 – Green	559.8	36	559.0	36	10
Band 4 – Red	664.6	31	664.9	31	10
Band 5 – Vegetation red edge	704.1	15	703.8	16	20
Band 6 – Vegetation red edge	740.5	15	739.1	15	20
Band 7 – Vegetation red edge	782.8	20	779.7	20	20
Band 8 – NIR	832.8	106	832.9	106	10
Band 8A – Narrow NIR	864.7	21	864.0	22	20
Band 9 – Water vapour	945.1	20	943.2	21	60
Band 10 – SWIR – Cirrus	1373.5	31	1376.9	30	60
Band 11 – SWIR	1613.7	91	1610.4	94	20
Band 12 – SWIR	2202.4	175	2185.7	185	20

Para el procesado y análisis de las imágenes hemos usado la misma plataforma GEE. Dicha plataforma tiene ciertas limitaciones de cara al desarrollo y conexiones externas con API, pero por contraposición, ofrece la posibilidad de visualizar los resultados previos a ser exportados, agilizando los procesos de desarrollo. El lenguaje de programación utilizado ha sido JavaScript, y se ha diseñado una herramienta propia para la realización de estos procesos. También se tiene la posibilidad de realizar los mismos procesos, pero trabajando esta vez de modo más simple, mediante la utilización de Python como lenguaje de programación y requiriendo solamente un ordenador local con acceso a internet. En este trabajo se ha utilizado la programación en JavaScript con la intención de poder usar los servidores propios de Google con lo que se simplifican los procesos de cálculo al tener acceso directo al banco de imágenes, además de la citada posibilidad de previvisualización de resultados.

Comparativamente con otros satélites gratuitos, éste es el de mayor resolución, tanto óptica como radiométrica, ya que sus anchos de bandas son más estrechos que los de sus competidores: Landsat 8 o Terra (MODIS). Para nuestro objetivo consideramos que las imágenes suministradas por los satélites Sentinel 2 son adecuadas, ya que recogen una gran cantidad de imágenes diarias. La utilizadas han sido las relacionados con Level-2A.

La descarga de las imágenes se hace en formato GeoTIFF, usando la tecnología Cloud Optimized GeoTIFF (COG). Se genera un archivo GeoTIFF normal que es alojado en un servidor de almacenamiento HTTP, con una organización interna que lo hace más eficiente para los flujos de trabajo propios de la nube.

Mediante la programación de varios módulos preparados a tal efecto se han recopilado las imágenes disponibles de la zona de estudio en las fechas establecidas. Como fecha de inicio para el estudio se ha marcado el mes 10 (1 de octubre, inicio del año hidrológico) de 2017; como fecha final de recopilación de imágenes se ha marcado el mes 9 (30 de septiembre) de 2020. Este intervalo de tiempo, que configura el periodo total de estudio, se ha subdivido en campañas y ciclos del cultivo.

La campaña se inicia con la llegada de las primeras lluvias (año hidrológico) porque su sentido es el observar variaciones estacionales relacionadas con las etapas del cultivo. Para ello se han distinguido 3 ciclos por campaña. Desde el mes de octubre al mes de febrero, como periodo húmedo, inicio de la cosecha, aplicación de abonados y posibles tratamientos fitosanitarios. De marzo a junio como época de floración y mayor crecimiento del cultivo, finalización de la cosecha unido a alguna poda menor. Por último, de junio a septiembre, son los meses más duros para la gestión hídrica del cultivo debido a las altas temperaturas y escasas precipitaciones.

En resumen, los periodos temporales de estudio para el cultivo de subtropicales se muestran a continuación en la Tabla 2: un período que va de 2017 a 2020 en el que se han considerado 3 campañas de producción anual: 2018, 2019 y 2020. Finalmente, dichas campañas constan de 9 ciclos.

Table 2. Secuencia temporal para la elección de las imágenescon especial referencia a las campañas y los ciclos del cultivo de subtropicales en la zona de estudio. Puede darse el caso que en otras zonas de estudio esto pueda cambiar o deba adaptarse a las condiciones de dicho tipo de cultivos.

Períodos	*Campañas*	*Ciclos*
2017-10-06	2017-2018	2017-10-01 / 2018-01-30
2020-09-25	2018-2019	2018-02-01 / 2018-05-30
	2019-2020	2018-06-01 / 2018-09-30
		2018-10-01 / 2019-01-30
		2019-02-01 / 2019-05-30
		2019-06-01 / 2019-09-30
		2019-10-01 / 2020-01-30
		2020-02-01 / 2020-05-30
		/ 2020-09-30

2.3. Control de calidad de las imágenes y minimización de las interferencias atmosféricas con técnicas Machine Learning.

El control de calidad de los datos es crucial en el uso de imágenes de teledetección para estudios cuantitativos y multitemporales, cuya intención es asegurar la calidad de los resultados. Uno de los principales problemas que tiene el uso de imágenes Sentinel-2 para este tipo de estudios es el de la corrección atmosférica y de iluminación.

En las imágenes Sentinel-2 debe realizarse un paso previo a su uso que es la transformación desde radiancia a reflectancia aparente en el techo de la atmósfera (TOA, top of atmosphere) para una superficie plana (Laurent et al., 2014). Esta transformación es sencilla y directa, pero debe completarse con el paso de reflectancia aparente a real, es decir, a nivel de la superficie (BOA, bottom of atmosphere). Las variables consideradas en la transformación de la radiancia a reflectancia BOA son la geometría de iluminación, el contenido en vapor de agua y el espesor óptico de aerosoles en la atmósfera (AOT). A ellas, se añade la posible influencia de las nubes, sobre todo cuando se trata de cirros o nubes traslúcidas (brumas), los cuales son habituales en los entornos semiáridos por sus condiciones atmosféricas habituales (calor en superficie y frio en altura), lo que produce unas condiciones de bruma diurna persistente ante la ausencia de viento. La calidad de los resultados de la corrección atmosférica también depende de la exactitud de los datos de entrada disponibles y del filtro de radiancia o reflectancia TOA que se aplique a la imagen (Zhanga et al., 2018).

La corrección de las imágenes se realiza con la herramienta Sen2Cor (Science Toolbox Exploitation Platform). Disponible online: http://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/sen2cor/. Sen2Cor es una herramienta Machine Learning para la depuración y formateo de productos Sentinel-2 Level-2A. Se puede utilizar para realizar la corrección atmosférica de los cirros de nubes de la parte superior de la atmósfera presentes en los datos de entrada. Adicionalmente se puede aplicar para valorar el espesor de la capa de aerosoles ópticos y el vapor de agua, con ello se pueden establecer indicadores para medir su presencia. De esta manera nos aseguramos obtener imágenes limpias de reflectancias atmosféricas que pueden repercutir negativamente en el análisis que se realice.

En este proceso de trabajo, en primer lugar, se debe crear una capa de borde en formato shp o geojson el área de estudio. En segundo lugar, es importante tener en cuenta como se escogen las imágenes disponibles para nuestro rango temporal de estudio. En tercer lugar, es conveniente elegir las imágenes de nuestra área de estudio atendiendo solo al tile o tiles (teselas en los que se encuadran las imágenes del satélite: 100 km² x 100 km², ortoimágenes en proyección UTM / WGS84), para posteriormente realizar un recorte de la delimitación de nuestra área de estudio con las imágenes escogidas, para que cada banda coincida sobre la misma geometría de entrada. Finalmente, deberemos eliminar los píxeles de cada imagen que estén vinculados con información sobre el vapor de agua (nubes), ya que esta reflectancia no es la de la superficie que buscamos estudiar y generaría valores negativos en nuestro análisis de índices de vegetación.

2.4. Selección de los índices de vegetación que formarán parte del análisis.

Durante los últimos años se han utilizado numerosos índices de vegetación para hacer estimaciones cuantitativas del índice de área foliar (LAI), porcentaje de cobertura del suelo, altura de la planta, biomasa, población de plantas y otros parámetros. La mayoría de las fórmulas se basan en proporciones o combinaciones lineales y explotan las diferencias en los patrones de reflectancia de la vegetación verde y otras cubiertas (Schlemmer et al., 2013; Marino y Alvino, 2021). En base a lo consultado en la literatura científica y a cierta experiencia de los autores en la aplicación de índices de vegetación hemos decidido utilizar para este trabajo los índices NDVI, NDWI, y MCARI2. Algunos índices, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de diferencia de agua normalizado (NDWI) son capaces de diferenciar la vitalidad del cultivo y el estrés hídrico. MCARI2 es un índice complementario que ayuda a valorar la interferencia del suelo entre otros aspectos.

Empezando por el NDVI, existe una gran variedad de modificaciones de este índice que son descritas por los numerosos autores que lo han aplicado (Chang et al., 2020; Modica et al., 2020; Costa et al., 2020). Adquiere la siguiente formulación general para los datos S2 (Ec.1):

(1)

$$NDVI = (R800 - R670) / (R800 + R670$$

$$NDVI= (R835.1-R664.5) / (R835.1+R664.5)$$

Donde Rx es la reflectancia en la longitud de onda (nm). En S2 la reflectancia o radiancia del canal infrarrojo se encuentra en una longitud de onda 835.1 nm (S2A) o 833 nm (S2B). Red es la banda B4, longitud de onda 664.5 nm (S2A) o 665 nm (S2B).

Para complementar la información obtenida con el índice NDVI, utilizamos NDWI (Normalized Difference Water Index), y como es sabido, se refiere a un índice diseñado para la detección remota del agua líquida. Ha sido utilizado por numerosos autores en distintas circunstancias (Campos et al., 2012; Doña et al., 2021) y nosotros lo utilizamos para monitorizar los cambios en el contenido de agua de las hojas, utilizando la reflectancia del infrarrojo próximo (NIR) y del infrarrojo medio (SWIR), su rango de reflectancia estaría definido entre 0.9 – 1.7 µm (Gao, 1996) Con este índice podemos estimar previamente el estado hídrico de los árboles de cara a soportar periodos de sequía. La combinación del NIR con el SWIR elimina las variaciones inducidas por la estructura interna de la hoja y el contenido de materia seca de la hoja, lo que mejora la precisión a la hora de valorar si se ha iniciado la recuperación del estado de humedad del cultivo. Adquiere la siguiente formulación (Ec.2):

(2)

$$NDWI= (RNIR-RSwir) / (RNIR + RSwir)$$

$$NDWI= (NIR(R800)-SWIR(R1510))/(NIR(R800)+SWIR(R1510))$$

Donde RSwir es la reflectancia o radiancia en el infrarrojo medio con una longitud de onda de 1.2–2.5Am. En S2, NIR es la banda B8, con una longitud de onda de 835.1nm (S2A) o 833nm (S2B); para el SWIR S2 ofrece una banda SWIR 1 banda B11 con una longitud de onda de 1613.7nm (S2A) o 1610.4nm (S2B) o SWIR 2, banda B12, con una longitud de onda de 2202.4nm (S2A) o 2185.7nm (S2B).

Hemos considerado necesario incluir otro índice para la estimación de LAI (Leaf Area Index) (Laurent et al., 2014; Lin et al., 2021) de manera que podamos completar los resultados que se obtienen con los dos índices anteriores. Probamos MCARI2 (Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index) que en sus versiones modificadas se muestra adecuado para realizar esta estimación. La idea general es utilizar un índice menos sensible a los efectos de la clorofila, más sensible a las variaciones de LAI verde y más resistente a los efectos del suelo y la atmósfera (Daughtry et al., 2000).

Se formula como (Ec. 3):

(3)

$$MCARI2 = 1.2[2.5(R800 - R670) - 1:3(R800 - R550)] / \sqrt{[(2R800+1)^2-(6R800-5\sqrt{R670})-0.5]}$$

3. RESULTADOS

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos tras la aplicación de los índices en el ámbito de estudio para el periodo definido: 2017-2020. Los valores máximos destacados se obtienen con el NDVI (0.890) seguido por el NDWI que rebaja su resultado a la mitad (0.488), mientras que MCARI2 presenta generalmente valores muy por debajo (0.331). Dicho comportamiento se reproduce de igual manera en la media (0.601,

0.222 y 0.186), mediana (0.623, 0.221 y 0.191) y la moda (0.666, 0.213 y 0.195) respectivamente. Con respecto a los mínimos, el NDVI no muestra valores negativos (0.368) al contrario de lo que ocurre con el NDWI y MCARI2, donde los se sitúan por debajo de 0 (-0.128 y -0.341 respectivamente). La STDV (desviación estándar) indica como el NDWI y el MCARI2 muestran una mayor dispersión en sus datos (0.862) y (0.653) respectivamente, mientras que el NDVI presenta valores mucho más ajustados a la media.

Tabla 4. Valores medios del periodo estudiado.

INDEX	*TIME FRAME*	*MAXIMUN*	*MEAN*	*MEDIAN*	*MINIMUN*	*MODE*	*STDV*	*VARIANCE*
NDVI	2017-2020	0.890	0.601	0.623	0.368	0.666	0.154	0.237
NDWI	2017-2020	0.488	0.222	0.221	-0.128	0.213	0.862	0.743
MCARI2	2017-2020	0.331	0.186	0.191	-0.341	0.195	0.653	0.427

Las Fig. 1, 2 y 3 muestran los resultados obtenidos para la zona de estudio con la aplicación de cada índice. Se observa una diferente sensibilidad de estos en relación con las diferentes condiciones de los cultivos por fincas agrícolas. En el NDVI se observa que el rango común para los cultivos subtropicales en esta zona se encuentra por término medio entre 0.03 y 0.8, dependiendo tanto de la vigorosidad como de la etapa del cultivo. La combinación de su formulación de diferencia normalizada y el uso de las regiones de absorción y reflectancia más altas de clorofila lo hacen robusto en una amplia gama de condiciones o ciclos del cultivo. No obstante, el NDVI satura en casos de dosel denso y multicapa y muestra una relación no lineal con parámetros biofísicos como el LAI verde; además los valores de reflectividad de la banda roja hacen referencia preferentemente a la parte superior del dosel de la planta, lo que significa que los valores de los niveles más bajos del dosel no aportan en la medición de NDVI. Esto afecta a la correlación de NDVI con parámetros del índice LAI (Leaf Area Index). El efecto aumenta en los árboles más frondosos o con las copas más desarrolladas. Por tanto, y cuando esto ocurre, podríamos decir que el índice está saturado al observarse valores altos de LAI.

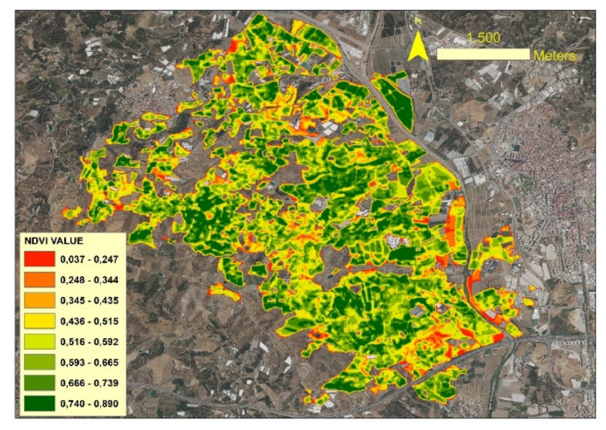


Figura 1. Resultados obtenidos con el índice NDVI. Los colores verdes muestran mejor estado y los colores rojos, peor estado.

Por su parte el índice NDWI muestra un contraste mayor de los datos pudiéndose observar que no todos los cultivos se encuentran en buen estado cuando se aplica este índice, presentando un comportamiento diferenciado por su estado hídrico. Este índice es sensible a los cambios en el contenido de agua del dosel de la vegetación, mostrándolo en los valores de reflectividad entre 857 nm y 1241 nm, con lo que se pueden encontrar diferencias en los comportamientos de absorción del agua hasta 1241 nm. Esto es debido a la dispersión variable de la reflectividad según la forma de las copas de los árboles; aunque en muchos casos la respuesta espectral obtenida sea similar en plantaciones homogéneas, se puede observar una débil respuesta que permite la diferenciación, ya que la reflectancia en NIR se ve matizada por la estructura interna de la hoja y el contenido de materia seca de dicha hoja (McFeeters, 1996; Jackson et al., 2004), pero no tanto por su estado por el contenido de agua. El valor de este índice varía de -1 a 1. El rango común para el cultivo subtropical cuando está verde es de -0.1 a 0.5 (Fig. 2).

Como se puede observar, los índices NDVI y MCARI2 presentan un resultado similar, mostrando el primero unos valores más homogéneos y el segundo una matización de los valores del primero, de tal manera que realiza una diferenciación de las zonas con mejores comportamientos en NDVI.

En función de lo expuesto en la literatura científica (Marsett et al., 2006; Van Coillie et al., 2014; Spencer, 2015) y con la finalidad de facilitar la interpretación de los resultados, se plantea una escala Likert, de tal manera que podamos valorar los resultados de un modo cualitativo (Tabla 5). La clasificación consta de 8 intervalos en los que, para cada uno de los índices, en función de su valor, se le asigna una descripción de estado del cultivo, desde estado pésimo a estado excelente. Al mismo tiempo hemos incluido información sobre las superficies que abarcan cada clase según su valoración en el ámbito de estudio.

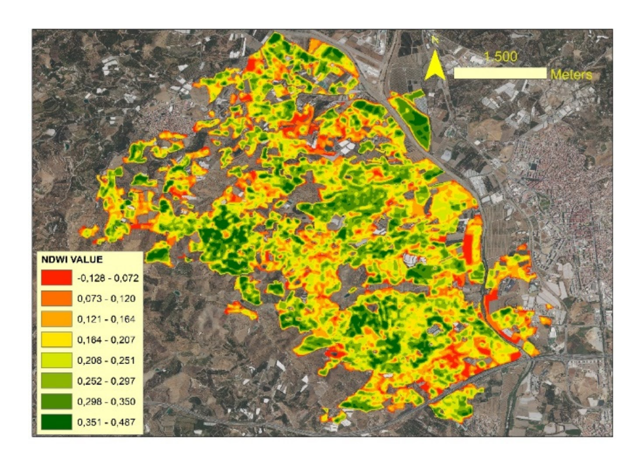


Figura 2. Resultados obtenidos con el índice NDWI. Los colores verdes muestran mejor estado y los colores rojos, peor estado.

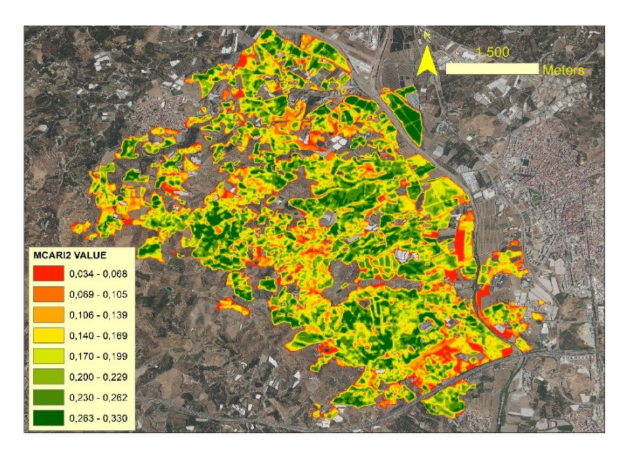


Figura 3. Resultados obtenidos con el índice MCARI2. Los colores verdes muestran mejor estado y los colores rojos, peor estado.

Tabla 5. Índice de valores medios y su equivalencia cualitativa en el área de estudio de 2017 a 2020 con el área total de cada intervalo.

Intervalo	*NDVI*	*Area (Has)*	*NDWI*	*Area (Has)*	*MCARI2*	*Area (Has)*	*Descripción*
1	0.037-0.247	44.36	-0.128-0.072	75.57	-0.341-0.068	86.45	Pésimo
2	0.248-0.344	90.62	0.073-0.120	141.30	0.069-0.105	134.96	Muy malo
3	0.345-0.435	124.52	0.121-0.164	206.12	0.106-0.139	183.72	Malo
4	0.436-0.515	172.16	0.165-0.207	262.90	0.140-0.169	208.02	Aceptable
5	0.516-0.592	239.87	0.208-0.251	269.10	0.170-0.199	240.22	Bueno
6	0.593-0.665	288.98	0.252-0.297	234.63	0.200-0.229	235.10	Sub-óptimo
7	0.666-0.739	284.25	0.298-0.350	192.36	0.230-0.262	226.36	Óptimo
8	0.740-0.890	220.43	0.351-0.487	82.85	0.263-0.330	150.05	Excelente

A continuación, hemos añadido unas gráficas que añaden la componente temporal a este trabajo y muestran la evolución de los datos en función de la dinámica fenológica (Fig. 4). Estos índices de vegetación

se relacionan bien entre ellos, a la vez que muestran los procesos vitales de las cubiertas analizadas. De hecho, es fácil observar las fluctuaciones debidas a la estacionalidad. En los climas semiáridos mediterráneos podemos encontrar dos máximos de precipitación que suelen coincidir con el otoño y la primavera, siendo además común la alternancia de periodos de precipitaciones relativamente abundantes con periodos de ausencia prolongados de las mismas; como regla general el estío es muy largo, empieza en mayo y suele acabar a finales de septiembre, estando caracterizado por altas temperaturas, casi ausencia de precipitaciones y un nivel muy bajo de humedad del aire, situaciones que obviamente repercuten sobre los árboles y que intentan ser paliadas mediante potentes sistemas de riego. Estos hechos se reflejan en las gráficas siguientes (Fig. 4).

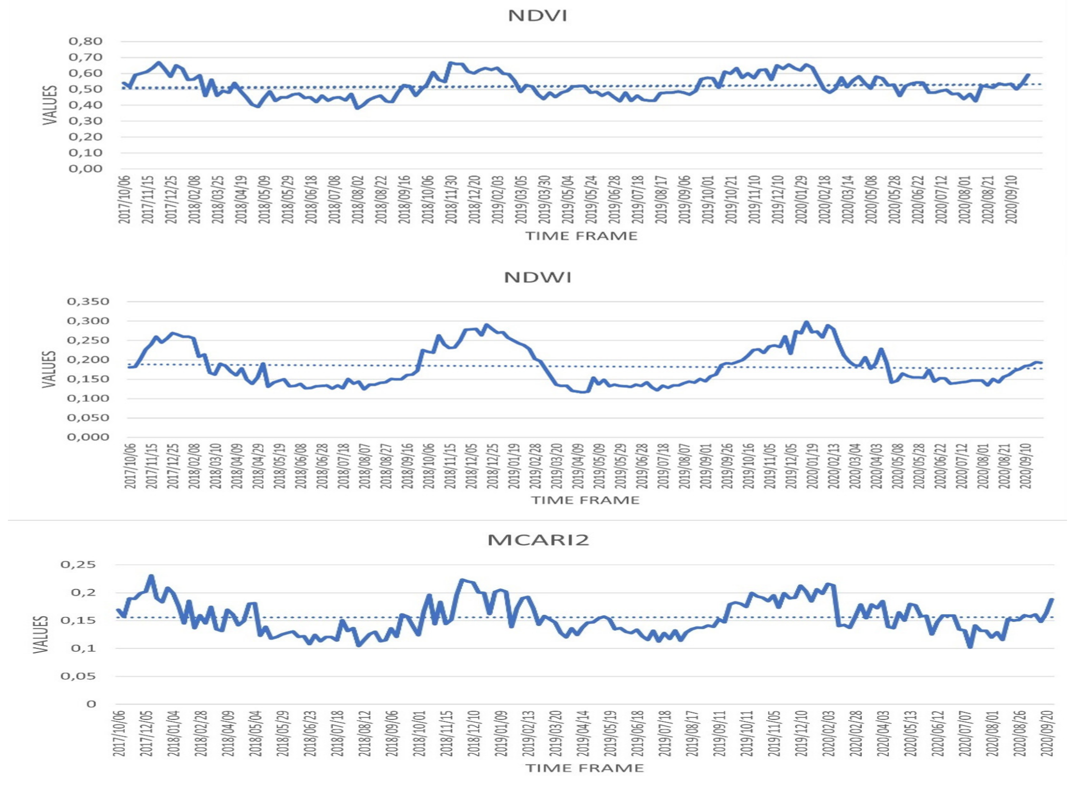


Figura 4. Evolución temporal de los valores de los índices aplicados entre 2017 y 2020: NDVI, NDWI y MCARI2.

4. CONCLUSIONES

Hemos utilizado estos tres índices con la finalidad de aportar elementos de análisis para mejorar la discriminación en este tipo de cultivos, el del subtropical: aguacate y mango fundamentalmente, en una zona donde se presentan diferentes situaciones de estas cubiertas. Dichas cubiertas presentan un comportamiento reflectivo muy distinto en las bandas que se utilizan en dichos índices, Red y NIR, fundamentalmente, lo que permite establecer diferencias de estado. Como se sabe, el empleo de estos índices está basado en su capacidad para discriminar las masas vegetales por sus comportamientos radiométricos en dichas bandas.

Tanto el NDVI, como el NDWI o el MCARI2 han sido profusamente utilizados para estimar diversos parámetros de diversas cubiertas vegetales. Dichos índices han revelado en este trabajo más contrastes y propiedades que los visualmente evidentes en las imágenes de color verdadero y falso color. Los índices han mostrado patrones significativos del comportamiento de los cultivos subtropicales bien reconocibles. Diversos autores ya apuntaban a las capacidades del NDVI y MCARI2 para dicha cuestión (Solano et al.,2019).

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a los responsables del acceso de datos de Copernicus (@CopernicusEU) por el acceso libre y gratuito a las imágenes que se han utilizado en este trabajo. Copernicus es el Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea que gestiona la Comisión Europea y que se aplica en colaboración con los Estados miembros, la Agencia Espacial Europea (ESA), la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT), el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF), las agencias de la UE y Mercator Océan. https://www.copernicus.eu/en

5. BIBLIOGRAFÍA

Boegh, E., Soegaard, H., Broge, N., Hasager, C. B., Jensen, N. O., Schelde, K., *y* Thomsen, A. (2002). Airborne multi-spectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*, *81*(2-3), 179-193. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00342-X

Bunting, E.L., Munson, S.M., Bradford, J.B. (2019). Assessing plant production responses to climate across water-limited regions using Google Earth Engine. Remote Sensing of Environment, 233, 111379. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111379

Campos, J.C., Sillero, N., Brito, J.C. (2012). Normalized difference water indexes have dissimilar performances in detecting seasonal and permanent water in the Sahara–Sahel transition zone. Journal of Hydrology, 464/465, 438–446. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.042

Capstaff, N.M., Domoney, C. & Miller, A.J. (2021). Real-time monitoring of rhizosphere nitrate fluctuations under crops following defoliation. Plant Method, 17**,** 11. https://doi.org/10.1186/s13007-021-00713-w

Clevers, J.G.P.W. y Gitelsonb, A.A. (2013). Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 23, 344-351. https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.008

Chen, J. M. (1996). Evaluation of vegetation indices and modified simple ratio for boreal applications. Canadian Journal of Remote Sensing, 22, 229 – 242. https://doi.org/10.1080/07038992.1996.10855178

Cheng, S.J., Bohrer, G., Steiner, A.L., Hollinger, D.Y., Suyker, A., Phillips, R.P., Nadelhoffer, K.J. (2015). Variations in the influence of diffuse light on gross primary productivity in temperate ecosystems. Agricultural and Forest Meteorology, 201, 98-110. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.002

Croft, H., Chen, J.M., Zhang, Y., Simic, A., Noland, T.L, Nesbitt, N., Arabian, J. (2015). Evaluating leaf chlorophyll content prediction from multispectral remote sensing data within a physically based modelling framework. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 102, 85-95. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.01.008

Darvishzadeh, R., Atzberger, C., Skidmore, A., Schlerf, M. (2011). Mapping grassland leaf area index with airborne hyperspectral imagery: A comparison study of statistical approaches and inversion of radiative transfer models. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(6), 894-906. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.09.013

Daughtry, C., Walthall, Ch., Kim, M.S., McMurtrey, J.E. (2000). Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. Remote Sensing of Environment, 74(2), 229-239. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9

Doña, C., Morant, D., Picazo, A., Rochera, C., Sánchez, J.M., Camacho, A. (2021). Estimation of Water Coverage in Permanent and Temporary Shallow Lakes and Wetlands by Combining Remote Sensing Techniques and Genetic Programming: Application to the Mediterranean Basin of the Iberian Peninsula. Remote Sens., 13, 652. https://doi.org/10.3390/rs13040652

Duan, T., Chapmana, S.C., Guob, Y., Zhenga, B. (2017). Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. Field Crops Research, 210, 71-80.

Gao, Bo-cai (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 58 (3), 257-266. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3

Haghverdi, A., Leib, B., Washington-Allen, R., Wright, W.C., Ghodsi, S., Grant, T., Zheng, M., Vanchiasong, P. (2019). Studying Crop Yield Response to Supplemental Irrigation and the Spatial Heterogeneity of Soil Physical Attributes in a Humid Region. *Agriculture*, *9*(2), 43. https://doi.org/10.3390/agriculture9020043

He, L., Wang, R., Mostovoy, G., Liu, J., Chen, J.M., Shang, J., Liu, J., McNairn, H., Powers, J. (2021). Crop Biomass Mapping Based on Ecosystem Modeling at Regional Scale Using High Resolution Sentinel-2 Data. Remote Sens., 13, 806. https://doi.org/10.3390/rs13040806

Jackson, T. J., Chen, D., Cosh, M., Li, F., Anderson M., Walthall, Ch., Doriaswamy P., Hunt, E.R. (2004). Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. Remote Sensing of Environment, 92, 475–482. https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.021

Jin, Z., Azzari, G., You, C., Di Tommaso, E., Aston, E., Burke, M., Lobell, D.B. (2019). Smallholder maize area and yield mapping at national scales with Google Earth Engine. Remote Sensing of Environment, 228, 115-128. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.016

Laurent, V.A.C., Schaepman, M.E, Verhoef, W., Weyermann, J., Chávez, R.O. (2014). Bayesian object-based estimation of LAI and chlorophyll from a simulated Sentinel-2 top-of-atmosphere radiance image. Remote Sensing of Environment, 140, 318–329. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.005

Li, J., Knapp, D.E., Lyons, M., Roelfsema, Ch., Phinn, S., Schill, S.R., Asner, G.P. (2021). Automated Global Shallow Water Bathymetry Mapping Using Google Earth Engine. Remote Sens., 13, 1469. https://doi.org/10.3390/rs13081469

Lin, L., Yu, K., Yao, X., Deng, Y., Hao, Z., Chen, Y., Wu, N., Liu, J. (2021). UAV Based Estimation of Forest Leaf Area Index (LAI) through Oblique Photogrammetry. Remote Sens., 13, 803. https://doi.org/10.3390/rs13040803 .

Maneta, M.P., Cobourn, K., Kimball, J.S., He, M., Silverman, N.L., Chaffin, B.C., Ewing, S., Ji, X., Maxwell, B. (2020). A satellite-driven hydro-economic model to support agricultural water resources management. Environmental Modelling & Software, 134, 104836. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104836

Marino, S. y Alvino, A. (2021). Vegetation Indices Data Clustering for Dynamic Monitoring and Classification of Wheat Yield Crop Traits. Remote Sens., 13, 541. https://doi.org/10.3390/rs13040541

Marković, M., Goran, K., Brkić, A., Atilgan, A., Japundžić-Palenkić, B., Petrović, D., Barač, Ž. (2021). Sustainable Management of Water Resources in Supplementary Irrigation Management. *Appl. Sci.*, *11*(6), 2451, https://doi.org/10.3390/app11062451

Marsett, R.C., Qi, J, Heilman, P., Biedenbender, Sh. H., Watson, M.C., Amer, S., Weltz, M., Goodrich, D., Marsett, R. (2006). Remote Sensing for Grassland Management in the Arid Southwest. Rangeland Ecology & Management, 59(5), 530-540. https://doi.org/10.2111/05-201R.1

Mcfeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17 (7), 1425-1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

Schlemmer, M., Gitelsonb, A., Schepers, J., Fergusona, R., Peng, Y., Shanahana, J., Rundquist, R. (2013). Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 25, 47-54. https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.04.003

Spencer, E.H. (2015). How to analyze Likert and other rating scale data. Currents in Pharmacy Teaching and Learning, 7(6), 836-850. https://doi.org/10.1016/j.cptl.2015.08.001

Solano, F., Di Fazio, S., Modica, G. (2019). A methodology based on GEOBIA and WorldView-3 imagery to derive vegetation indices at tree crown detail in olive orchards. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation, 83, 101912. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101912

Tian, Z., Jin, S., Cun, L., Wen, Ch. (2019). Potential Bands of Sentinel-2A Satellite for Classification Problems in Precision Agriculture. International Journal of Automation and Computing, 16(1), 16-26. https://doi.org/10.1007/s11633-018-1143-x

Van Coillie, F.M.B., Gardin, S., Anseel, F., Duyck, W., Verbeke, L.P.C., De Wulf, R. (2014). Variability of operator performance in remote-sensing image interpretation: the importance of human and external factors. International Journal of Remote Sensing, 35 (2), 754-778. https://doi.org/10.1080/01431161.2013.873152

Vanegas F., Bratanov, D., Powell, K., Weiss, J., Gonzalez, F. (2018). A Novel Methodology for Improving Plant Pest Surveillance in Vineyards and Crops Usi,g UAV-Based Hyperspectral and Spatial Data. Sensors**,** 18(1), 260. https://doi.org/10.3390/s18010260

Zhanga, H.K., Roya, D.P., Yana, L., Lia, Z., Huanga, H., Vermoteb, E., Skakunb, S., Rogerb, J. C. (2018). Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences. Remote Sensing of Environment, 215, 482–494. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.031



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 116-125

Análisis espaciotemporal y multisectorial del uso de tarjetas bancarias: Hacia una nueva geografía urbana del consumo

G. Romanillos[1], J. Carpio-Pinedo[2], J. C. García-Palomares[1], J. Gutiérrez[1], D. Aparicio-Pindado[1], M. S. Hernández Martín-Caro[3].

[1] Departamento de Geografía, Universidad Complutense de Madrid. Calle Profesor Aranguren SN, 28040 Madrid.
[2] Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio, Universidad Politécnica de Madrid.
[3] Dirección General de Economía. Ayuntamiento de Madrid. Madrid.

gustavoromanillos@ucm.es, jose.carpio@upm.es, jcgarcia@ucm.es, javiergutierrez@ghis.ucm.es, hernandezmms@madrid.es.

RESUMEN: La distribución espacial de las actividades comerciales resulta crucial para apoyar estilos de vida saludables, lograr espacios públicos habitables y mejorar la sostenibilidad ambiental, social y económica en nuestras ciudades. Por otro lado, las actividades comerciales requieren mantener un determinado flujo de gastos a lo largo del tiempo para garantizar su propia viabilidad. Entender la distribución espacial y temporal del gasto es por tanto fundamental y, sin embargo, la falta de datos detallados y completos ha impedido acometer esta tarea hasta el momento con alta resolución espacio temporal.
Los datos de tarjetas bancarias allanan el camino para una nueva geografía urbana del gasto, gracias a su fina granularidad espacial y temporal junto con la cobertura uniforme de todos los sectores comerciales. En este trabajo analizamos las distribuciones temporales, espaciales y espaciotemporales del gasto a escala intraurbana en la ciudad de Madrid, combinando herramientas de geoestadística espacial con análisis de conglomerados y herramientas espaciotemporales. Nuestro análisis confirma el fuerte gradiente centro-periferia descrito en la literatura previa, con un CDB integrado por distintas áreas especializadas. El documento demuestra que los datos de tarjetas bancarias tienen un gran potencial para respaldar una nueva geografía del gasto que podría fortalecer la toma de decisiones en la planificación urbana y comercial.

Palabras-clave: análisis espacial, Geografía económica, Big Data, comercio, Madrid.

1. INTRODUCCIÓN

La distribución de las actividades comerciales en el espacio urbano es clave para promover la sostenibilidad urbana, la vitalidad del espacio público, la cohesión social y la salud pública (Jacobs, 1961; Sevtsuk, 2010). Por otro lado, la viabilidad de las actividades comerciales depende de su beneficio y de un flujo de gastos de los clientes a lo largo del tiempo. En consecuencia, comprender la lógica espaciotemporal del gasto ha sido durante mucho tiempo un objetivo para los planificadores y minoristas. La falta de datos accesibles y de alta calidad ha limitado la investigación sobre la distribución espacial de la actividad comercial (Araldi y Fusco, 2019). Sin embargo, el big data del uso de tarjetas bancarias tiene un gran potencial para lograr este objetivo, gracias a niveles de detalle y extensión nunca vistos, tanto en el espacio como en el tiempo, y para diversos sectores comerciales (Di Clemente et al., 2018; Lenormand et al., 2015; Sobolevsky et al., 2016). Comprender los patrones espaciotemporales multisectoriales de gasto puede respaldar una mejor planificación de las instalaciones comerciales y las decisiones de ubicación (Carpio-Pinedo y Gutiérrez, 2020).

El objetivo de este estudio es desarrollar un análisis geográfico novedoso del gasto, con una cuádruple contribución a la literatura internacional: primero, desagregado a escala intraurbana; segundo, detalles temporales, variaciones espaciales y espaciotemporales; tercero, distinguir varios sectores comerciales (alimentación, moda, ocio, etc.), que a menudo muestran patrones espaciales radicalmente diferentes, según la literatura previa; y cuarto, aprovechar el big data generado por las transacciones con tarjetas bancarias. El caso de estudio es la ciudad de Madrid (España). La discusión de los resultados utiliza modelos clásicos de ubicación minorista para comparar y como fuente de principios explicativos.

2. ANTECEDENTES

Por un lado, el presente trabajo aborda el análisis de la distribución espacial de las actividades comerciales. Su distribución dentro de una ciudad es un fenómeno observado desde tiempos muy remotos: la concentración de tiendas y puestos en los mercados centrales, plazas y calles principales en contraste con las zonas residenciales exteriores y tranquilas. Debido al papel estructurador clave de las áreas comerciales para ciudades y regiones enteras, los geógrafos y economistas se han propuesto comprender las lógicas espaciales del comercio utilizando enfoques tanto teóricos como empíricos. Según la literatura previa, el agrupamiento espacial puede ser el resultado de diferentes lógicas, como la conveniencia espacial (ubicaciones más accesibles), las economías de aglomeración (ahorro de costos) y el principio de mínima diferenciación basado en la desconfianza mutua de los competidores (Hotelling, 1929) explican por qué las empresas se benefician de ubicarse cerca unas de otras. Como resultado, la agrupación de tipos similares de tiendas se manifiesta en muchas de nuestras ciudades para algunos tipos de negocios (por ejemplo, joyerías, boutiques de alta costura y tiendas de lujo), mientras que otras áreas pueden permanecer desprovistas de los productos más básicos (Desjardins, 2010).

Por otro lado, este estudio analiza la distribución espacial del gasto en actividades comerciales. Toda empresa tiene como objetivo maximizar su beneficio y, para lograr este objetivo, debe comprender la lógica del gasto de los clientes. Hasta hace muy poco tiempo, los principales métodos para estudiar el gasto habían sido estudios de campo a medida (Lloyd y Jennings, 1978), mayoritariamente encuestas, tanto a clientes como a empresas (Buckinx y Van den Poel, 2005). Sin embargo, estos métodos implican muchos costos y deben limitar su alcance en espacio, tiempo, tipo de consumo o tipo de clientela. Por ejemplo, investigaciones previas han analizado el gasto en productos específicos como el tabaco (Desai et al., 2012), en eventos específicos como maratones (Wicker et al., 2012) y festivales de música (Borges et al., 2016), o tipos específicos de clientes como turistas (van Loon y Rouwendal, 2017). Como resultado, la aplicabilidad de sus resultados ha sido útil, pero no ha conducido a una comprensión global del fenómeno.

En los últimos años, la digitalización de la mayoría de los aspectos de la actividad humana ha permitido generar grandes volúmenes de datos, ofreciendo oportunidades sin precedentes para los estudios urbanos. Investigaciones recientes han aprovechado nuevas fuentes de big data para el análisis intraurbano de patrones de consumo, por ejemplo, utilizando puntos de interés de Google y datos generados por usuarios de redes sociales (Carpio-Pinedo y Gutiérrez, 2020; Salas-Olmedo et al., 2018).

Los datos de transacciones de tarjetas bancarias son generados a partir del uso de un dispositivo por parte de los consumidores, normalmente un terminal de pago, y gracias a su geolocalización, ofrecen una oportunidad extraordinaria para cuantificar y visualizar la distribución espacial y temporal del gasto a escala intraurbana cubriendo ciudades enteras. Además, los datos de pago con tarjeta bancaria proporcionan muestras muy amplias, ya que el uso de las tarjetas se ha ido generalizando progresivamente en las últimas décadas. Los pagos con tarjetas bancarias aumentan en relación con los pagos en efectivo a medida que aumenta el monto del pago. Según datos de 2019, en la zona del euro el 24% de las transacciones se realizaron con tarjetas bancarias y el 73% en efectivo (Banco Central Europeo, 2020), mientras que el valor de los pagos fue del 41% con tarjeta y el 48% en efectivo. En España, el uso de tarjetas bancarias está menos extendido que en la zona del euro, con el 15% de las transacciones y el 28% del valor de los pagos.

La investigación con datos de tarjetas bancarias aún está poco desarrollada a pesar de sus beneficios: los datos de tarjetas bancarias son muy sensibles y contienen información protegida por leyes y reglamentos de privacidad y confidencialidad. Sin embargo, algunos académicos han comenzado a analizar estos datos con diferentes objetivos: clasificar las ciudades en función de la actividad económica tanto de los residentes como de los turistas (Sobolevsky, Sitko, Grauwin, et al., 2014), inferir las características socioeconómicas de las regiones (Hashemian et al., 2017) para medir la resiliencia económica (Alfaro Martinez et al., 2016), y para describir patrones de movilidad (Lenormand et al., 2015).

Sin embargo, la escala intraurbana está ausente en la mayoría de estos análisis. Una primera excepción es el trabajo de Di Clemente et al. (2018), quienes usaron datos de transacciones para deducir patrones de comportamiento de compra para construir una tipología de 'estilos de vida' y perfiles de consumidores, y luego mapearon estos 'estilos de vida' a escala intraurbana, pero con sin enfoque en la distribución espacial del consumo y sin consideración de los volúmenes de gasto. También a escala intraurbana, Yoshimura et al. (2020) usaron datos de ingresos de tiendas para calcular las correlaciones con la densidad y la conectividad de la red de calles, pero el análisis de la distribución espacial no fue el enfoque. Recientemente, Aparicio y colaboradores (2021) analizaron la distribución espacial del gasto a escala intraurbana, pero se enfocaron en los turistas y no hicieron distinción de sectores comerciales.

3. CASO DE ESTUDIO Y DATOS

El estudio se centra en Madrid, ciudad de 3,3 millones de habitantes en 2020, que destaca por su diversidad de entornos comerciales: clústeres de barrios no planificados de diferentes escalas que conviven con proyectaron centros comerciales modernos (Carpio-Pinedo, 2020; Carpio-Pinedo y Gutiérrez, 2020; López de Lucio et al., 1996; López de Lucio y Parrilla Gorbea, 2006).

Trabajos previos han analizado la estructura comercial intraurbana de Madrid desde el punto de vista de la dimensión física (número de locales comerciales inmobiliarios y superficie construida), la dimensión económica (número de negocios abiertos) y la dimensión socio-simbólica (popularidad, prestigio, o 'capital simbólico' utilizando como proxy las publicaciones de los mecenas en las redes sociales) (Carpio-Pinedo y Gutiérrez, 2020), pero aún no desde el punto de vista del gasto.

Este estudio se basa en los datos de todas las transacciones en terminales de puntos de venta del banco BBVA, en establecimientos de la ciudad de Madrid, durante el año 2018. BBVA es el segundo banco español, con una cuota de mercado del 14,5%. Para 2018, el conjunto de datos incluye 52,9 millones de transacciones y más de 68 mil millones de euros. Los datos de BBVA se han utilizado en trabajos académicos anteriores para diferentes objetivos con resultados sobresalientes (Alfaro Martinez et al., 2016; Aparicio et al., 2021; Hashemian et al., 2017; Lenormand et al., 2015; Sobolevsky et al., 2015, 2016; Sobolevsky, Sitko, Combes, et al., 2014; Sobolevsky, Sitko, Grauwin, et al., 2014; Yoshimura et al., 2020).

Los volúmenes de transacciones y gastos se clasifican en varios sectores comerciales y se agregan espacialmente en celdas de 500x500 metros. La agregación temporal es el mes nominal (enero, febrero, etc.). Los datos de gasto se expandieron en función de la cuota de mercado de BBVA y el porcentaje de uso de tarjeta sobre otros medios de pago por sector comercial (Esselink y Hernández, 2017).

Este estudio utiliza trece variables de gasto (en euros) por cada sector comercial: una para el gasto de cada mes y una más para el gasto total del año 2018. Por otro lado, los sectores comerciales elegidos para este estudio son los siguientes:

- Bares y Restaurantes (BR): bares, cafeterías, restaurantes, comida rápida, pubs y discotecas.
- Moda (Fa): cadenas y pequeñas tiendas de moda que venden ropa, zapatos, joyas, relojes, etc.
- Alimentos (Fo): supermercados y pequeñas tiendas de alimentos como tiendas de comestibles.
- Ocio (L): cines, teatros, otros espectáculos, museos, atracciones turísticas y casas de apuestas.
- Salud (H): farmacias, ópticas y servicios médicos de pago.
- Bienestar y Belleza (WB): tiendas de productos de bienestar y belleza (cosmética, perfumería, etc.), peluquerías y otros servicios de belleza/bienestar.
- Total (Total): todo lo anterior más gastos en otros sectores y no clasificados por cuestiones de confidencialidad.

Tabla 1. Estadísticas básicas de los datos clasificados según sector comercial. Datos de gato en millones de euros.

	BR	*Fa*	*Fo*	*L*	*H*	*WB*	*TOTAL*
Celdas totales	509	244	258	40	442	322	946
Gasto total (Mill. €)	15.261,4	6.412,7	1.986,7	609,2	2.639,9	1.392,1	68.083,5
% sobre el gasto total	22,4%	9,4%	2,9%	0,9%	3,9%	2,0%	100%
Mínimo (Mill. €)	0	0	0	0	0	0	0,007
Máximo (Mill. €)	580,117	714,859	81,390	172,812	71,288	81,480	2.268,302
Media (Mill. €)	16,133	6,779	2,100	0,644	2,791	1,472	71,970
Desv. estándar (Mill. €)	48,094	48,564	7,051	6,845	7,228	4,773	162,640
Coeficiente de variación	298,1%	716,4%	335,7%	1063,0%	259,0%	324,3%	226,0%

4. METODOLOGÍA

4.1. Análisis temporal

Para describir la distribución temporal del gasto dentro de cada sector comercial, calculamos la diferencia entre cada valor mensual y el promedio anual. Este cálculo se realiza en términos relativos (%) para permitir comparaciones entre sectores.

4.2. Análisis espacial

Para describir la distribución espacial del gasto a escala intraurbana utilizamos dos tipos de análisis. En primer lugar, llevamos a cabo una autocorrelación espacial global: análisis de agrupamiento alto/bajo. La autocorrelación espacial (Getis-Ord General G) evalúa el grado general de agrupamiento para valores altos o bajos (cuán concentrados están los valores de gasto alto o bajo en la ciudad de Madrid). Esta herramienta estadística inferencial calcula la puntuación z y el valor p (Getis y Ord, 1992; Mitchell, 2005). Un valor de puntuación z positivo y estadísticamente significativo indica que los valores de gastos altos se agrupan en el área de estudio, mientras que un valor de puntuación z negativo y estadísticamente significativo indica que los valores de gastos bajos se agrupan en esta área. Finalmente, un valor p no significativo significaría que los valores se distribuyen aleatoriamente. Esperamos encontrar valores de puntaje z positivos y estadísticamente significativos, que representen una alta concentración espacial del gasto. Aplicamos esta herramienta no solo al análisis del gasto total, sino también a cada uno de los sectores comerciales, con el fin de analizar en qué sectores comerciales se concentra más espacialmente el gasto.

En segundo lugar, dado que las estadísticas G generales de Getis-Ord revelan el grado general de agrupamiento, pero no indican dónde se ubican los clústeres de consumo espacial potencial, llevamos a cabo un análisis de Autocorrelación espacial local – Hotspot, calculando el estadístico Gi* de Getis-Ord , obteniendo un z-score, un p-value y un bin de nivel de confianza. Los puntos calientes y fríos pueden identificarse como concentraciones locales estadísticamente significativas de valores altos y bajos, respectivamente (Getis y Ord, 1992; Mitchell, 2005). Nuevamente, aplicamos esta herramienta a cada uno de los sectores comerciales, para que podamos identificar los puntos críticos de gasto (valores de puntaje z positivos y estadísticamente significativos) para cada uno de los sectores comerciales.

4.3. Análisis espaciotemporal

Para explorar la distribución espaciotemporal del gasto en Madrid, llevamos a cabo un análisis de Conglomerados de Series Temporales. Este análisis identifica grupos de ubicaciones que muestran características de series temporales similares con respecto a las variables relevantes, es decir, el gasto. Más concretamente, realizamos dos análisis diferentes. En primer lugar, identificamos clústeres con valores absolutos de gasto similares a lo largo del tiempo y, en segundo lugar, identificamos clústeres con un perfil de gasto similar a lo largo del tiempo. En este segundo caso, las ubicaciones se agrupan cuando sus valores tienden a aumentar o disminuir al mismo tiempo y más bien proporcionalmente (cuando sus valores están correlacionados).

5. RESULTADOS

5.1. Análisis temporal

Las variaciones temporales revelan similitudes y diferencias entre sectores comerciales. Por un lado, todos los sectores muestran la mayor disminución temporal en agosto. Al ser el mes más habitual de largas vacaciones de verano, la reducción de la población se traduce en pérdidas de gasto del -29,7% en relación a la media anual. Por otro lado, casi todos los sectores muestran picos de crecimiento en diciembre, probablemente debido a la Navidad y otras festividades y su consumo relacionado, también en la alimentación (la cena abundante de Nochebuena, el almuerzo de Navidad y la cena de Nochevieja son tradiciones comunes en España).

Los sectores con el patrón temporal más similar al patrón de gasto total son Bares y Restaurantes (por ser el sector más importante), y sectores básicos o de “bajo orden” como Alimentos, Salud y Bienestar y Belleza. La moda muestra un pico único de alto gasto en enero, probablemente debido a las ventas típicas de este sector en este mes. El gasto en Ocio experimenta los comportamientos más divergentes, probablemente por el impacto de las vacaciones y el clima: gran consumo de ocio interior en noviembre y diciembre por las temperaturas invernales, Navidad y varios puentes donde los españoles de otras regiones suelen visitar Madrid; en contraste con el bajo gasto en los meses de primavera, posiblemente relacionado con la preferencia por las actividades al aire libre en esta época del año, que muchas veces son gratuitas.

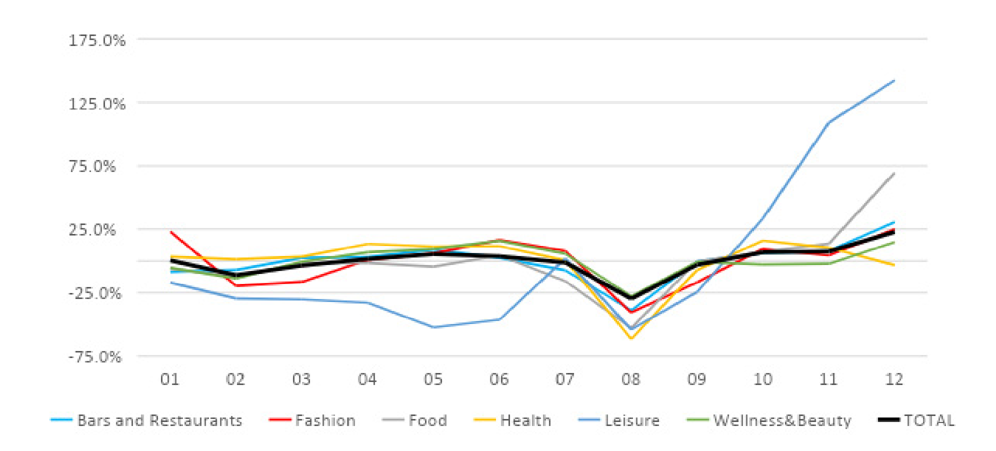


Figura 1. Diferencia entre el gasto mensual y la media anual (%) por tipo de sector comercial.

5.2. Análisis espacial

Se calcularon las estadísticas High-Low Clustering (Getis-Ord General G) para todas las categorías de gasto con el fin de medir el grado de concentración de valores altos/bajos (Tabla 2). Los resultados obtenidos permiten rechazar la hipótesis nula (no hay agrupamiento espacial de los valores de las características), ya que los valores de p son extremadamente bajos en todos los casos. Todos los valores de puntuación z son positivos, por lo que se debe concluir que los valores altos se agrupan en todas las categorías de gasto dentro de nuestra área de estudio. Bares y Restaurantes fue el sector más agrupado (puntuación z = 40,65); en cambio, el valor de z-score más bajo fue Alimentos (15,35).

Tabla 2. Estadísticas de High-Low Clustering General G.

	TOTAL	*BR*	*Fa*	*Fo*	*H*	*L*	*WB*
Observado General G	0,0296	0,0537	0,1254	0,0287	0,0361	0,1940	0,0402
z-score	32,7978	40,6482	19,3379	15,3523	32,7194	16,4118	25,5261
p-value	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Los mapas de la Fig.2 muestran la distribución espacial de GiZScores según los sectores comerciales (categorías de gasto). Tipos de comercio menos especializados, como Alimentación, Salud y Bienestar y Belleza, muestran una menor intensidad calorífica en el centro de la ciudad y una mayor extensión hacia la periferia, ya que se trata de actividades en las que la proximidad cobra un valor especial. La moda está muy concentrada espacialmente, con dos puntos calientes en el centro, la zona comercial de moda del centro histórico (Puerta del Sol y Gran Vía) y la zona comercial de lujo conocida como "la milla de Oro" (+Barrio de Salamanca), siendo el último de ellos el de mayor punto de atracción debido al alto valor de los artículos que allí se venden. Los establecimientos de ocio se ubican principalmente en el centro histórico, aunque es posible identificar puntos cálidos y templados de segundo nivel en áreas de centralidad intermedia alrededor del centro de la ciudad. Finalmente, los bares y restaurantes muestran un patrón espacial más simple, similar al del gasto total: el gradiente centro-periferia es más suave hacia el norte que hacia el sur y se identifican puntos templados en algunas localidades periféricas.

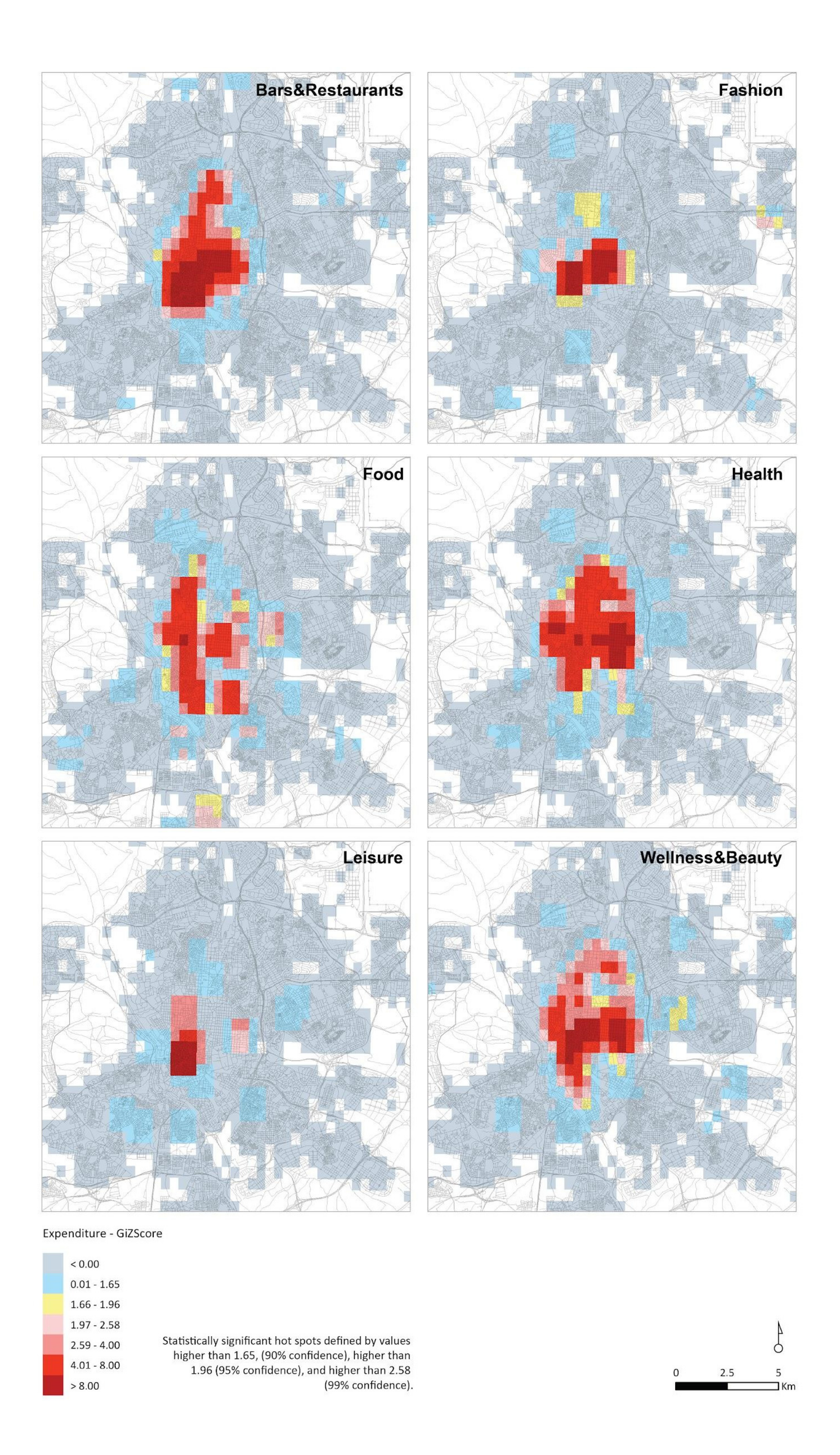


Figura 2. GiZScores: Distribución espacial de los valores según categoría de gasto.

5.3. Análisis espaciotemporal: Análisis de conglomerados de series temporales del gasto total

Los resultados del análisis de agrupamiento de series temporales permitieron la identificación de diferentes grupos de ubicaciones con valores de gasto total similares a lo largo del tiempo. Las figura 3 y 4 ilustran la distribución espacial de los conglomerados resultantes en un mapa y los perfiles temporales de los conglomerados en un gráfico. La figura 3 muestra un patrón centro-periferia, donde se diferencian diferentes clusters de alto valor de gasto tanto en el centro de la ciudad (Sol) como en el distrito de Salamanca (el de mayor

nivel de ingresos), la zona de Nuevos Ministerios (área comercial junto a uno de los principales distritos de oficinas de la ciudad) y la zona del aeropuerto. El mapa también revela algunas ubicaciones excepcionales de alto valor de gasto en la periferia, generalmente correspondientes a centros comerciales. El gráfico evidencia un patrón temporal similar para todos los clústeres, con una importante disminución del gasto en agosto y un aumento significativo en torno a la época navideña (diciembre y enero). Los gráficos también evidencian que este patrón general es más fuerte para los grupos de valores de gasto más altos. La figura 4, en cambio, no muestra un patrón espacial tan claro, aunque los perfiles 2 y 4 se extienden esencialmente en la periferia.

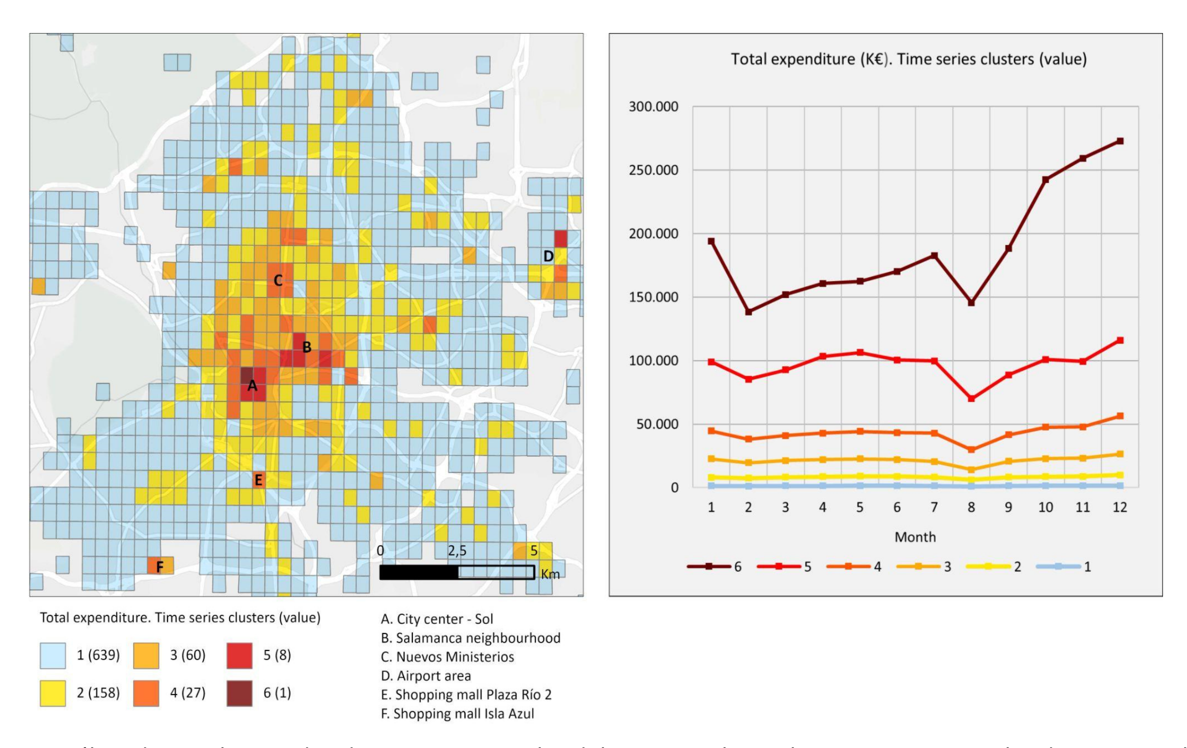


Figura 3. Análisis de conglomerados de series temporales del gasto total. Localizaciones con un valor de gasto similar.

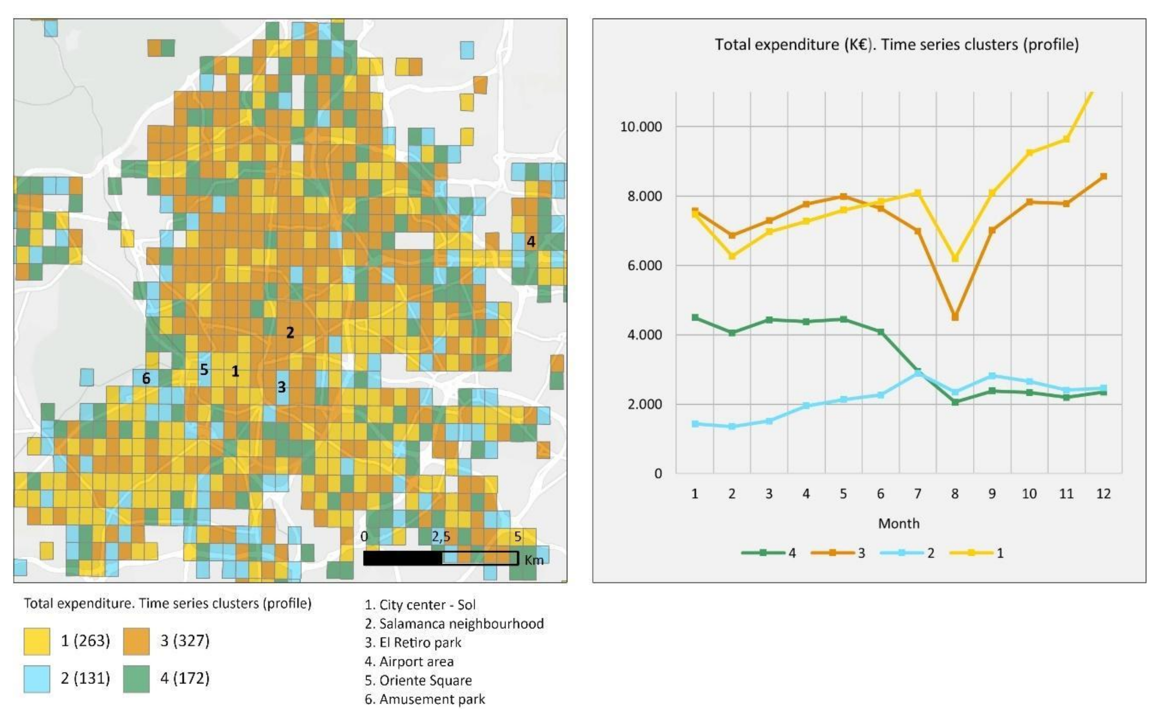


Figura 4. Análisis de conglomerados de series temporales del gasto total. Localizaciones con un perfil de gasto similar.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados sobre las variaciones temporales del gasto se corresponden con la literatura previa y el conocimiento general en el caso de estudio. Sin embargo, el análisis de datos de tarjetas bancarias ha permitido la comparación de diversos sectores comerciales, y algunos sectores como el ocio muestran variaciones temporales más marcadas, quizás más de las esperadas. Por el contrario, sectores que generalmente se perciben como más estacionales no muestran tales cambios, como la moda. Como era de esperar, el gasto con menor variación temporal (similar al perfil temporal de gasto total) es el gasto en bares y restaurantes (el sector más grande) y los productos y servicios más básicos (alimentación, salud, bienestar y belleza).

Por otro lado, el análisis de los entornos comerciales de la ciudad de Madrid a partir de datos de tarjetas bancarias confirma el claro gradiente centro-periferia deducido por la teoría de la oferta de alquiler (Alonso, 1960, 1964), donde sectores especiales (ocio, moda, etc.) obtienen más beneficios que otros y son más capaces de optar por las mejores ubicaciones (las más céntricas y accesibles).

El análisis espaciotemporal permitió explicar con más detalle algunos de los hallazgos del análisis espacial, destacando el contraste centro-periferia, que se correspondía con diferentes extensiones para cada sector comercial. A diferencia del análisis solo espacial, el análisis espaciotemporal ha identificado un mayor número de subcentros secundarios, aislados, como centros comerciales en las afueras. Además, el análisis espaciotemporal nos permitió explorar mejor algunos patrones generales identificados en el análisis temporal. Por ejemplo, los análisis de series temporales revelaron cómo el patrón de gasto general a lo largo del año (gasto bajo durante el verano y alto en Navidad) fue más fuerte en ciertas áreas, correspondientes a grupos de gasto alto que a los de gasto bajo.

Entre las posibles limitaciones de este estudio, destaca la disponibilidad, no de datos de cada transacción con tarjeta bancaria, sino de datos agregados por celdas de un tamaño determinado (500x500 m). Por lo tanto, no podemos comprobar cuál es el tamaño de celda más adecuado para analizar la autocorrelación espacial e identificar clústeres de gasto. Esta limitación no está relacionada con los datos de transacciones de tarjetas bancarias en sí, sino con el nivel de agregación espacial en el que se distribuyen. En cualquier caso, en nuestra opinión, el tamaño de celda de la malla es adecuado para producir análisis útiles para la toma de decisiones. Las celdas de cuadrícula más grandes reducirían la aplicabilidad de nuestro análisis, mientras que las celdas más pequeñas generarían problemas de confidencialidad.

Futuras líneas de investigación deberían comparar los resultados de Madrid con los de otras ciudades, incluyendo también sistemas metropolitanos más complejos con ciudades satélite, más expansión suburbana y áreas rurales. Finalmente, futuro trabajos podrían apuntar a explicar la distribución espacial del gasto utilizando regresiones con posibles predictores como el entorno construido, la accesibilidad, variables socioeconómicas o socio-simbólicas (Aparicio et al., 2021). Algunas de estas probables relaciones con el entorno construido y la accesibilidad podrían ser un primer paso hacia la integración de la previsión de gastos en el marco de planificación espacial. De hecho, aprovechando las nuevas fuentes de datos, el tipo de resultados obtenidos en este documento podría informar las decisiones de planificación y venta minorista.

7. BIBLIOGRAFÍA

Alfaro Martinez, E., Hernandez Rubio, M., Maestre-Martínez, R., Murillo Arias, J., Patane, D., Zerbe, A., Kirkpatrick, R., y Luengo-Oroz, M. (2016). Measuring Economic Resilience to Natural Disasters with Big Economic Transaction Data. *ArXiv*, abs/1609.0.

Alonso, W. (1964). *Location and Land Use: Toward a General Theory of Land Rent*. Harvard University Press. https://doi.org/10.4159/harvard.9780674730854

Aparicio, D., Martín-Caro, M. S. H., García-Palomares, J. C., y Gutiérrez, J. (2021). Exploring the spatial patterns of visitor expenditure in cities using bank card transactions data. *Current Issues in Tourism*, 0(0), 1–19. https://doi.org/10.1080/13683500.2021.1991898

Araldi, A., y Fusco, G. (2019). Retail Fabric Assessment : Describing retail patterns within urban space. *Cities*, 85(2019), 51–62. https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.11.025

Bernabeu-Bautista, Á., Serrano-Estrada, L., Perez-Sanchez, V. R., y Martí, P. (2021). The Geography of Social Media Data in Urban Areas: Representativeness and Complementarity. *ISPRS International Journal of Geo-Information* (Vol. 10, Issue 11). https://doi.org/10.3390/ijgi10110747

Berry, B. J. L. (1967). *Geography of Market Centers and Retail Distribution*. Prentice-Hall.

Borges, A. P., Rodrigues, P., y Matias, Á. (2016). Customer satisfaction and expenditure behaviour in musical festivals: The optimus primavera sound case study. *Tourism Economics*, 22(4), 825–836. https://doi.org/10.1177/1354816616654255

Buckinx, W., y Van den Poel, D. (2005). Customer base analysis: partial defection of behaviourally loyal clients in a non-contractual FMCG retail setting. *European Journal of Operational Research*, 164(1), 252–268. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.12.010

Cachinho, H. (2014). Consumerscapes and the resilience assessment of urban retail systems. *Cities*, 36, 131–144. https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.10.005

Carpio-Pinedo, J. (2020). *Spaces of consumption in the mobile metropolis: symbolic capital, multi-accessibility and spatial conditions for social interaction* [Universidad Politécnica de Madrid]. https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.65613

Carpio-Pinedo, J., y Gutiérrez, J. (2020). Consumption and symbolic capital in the metropolitan space: Integrating 'old' retail data sources with social big data. *Cities*, 106. https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102859

Christaller, W. (1966). *Central places in Southern Germany*. Prentice-Hall.

Cliquet, G. (ed.). (2006). *Geomarketing. Methods and Strategies in Spatial Marketing*. Hermes.

Crewe, L. (2000). Geographies of retailing and consumption. *Progress in Human Geography*, 24(2), 275–290.

Desai, K. T., Gharat, V., Nayak, S., Patel, P., y Bansal, R. (2012). Tobacco smoking patterns, awareness and expenditure: a cross-sectional overview from Surat City, India. *Tobacco Control and Public Health in Eastern Europe*, 2, 25–32.

Desjardins, E. (2010). The urban food desert: Spatial inequality or opportunity for change?. *Imagining Sustainable Food Systems: Theory and Practice*.

Di Clemente, R., Luengo-Oroz, M., Travizano, M., Xu, S., Vaitla, B., y González, M. C. (2018). Sequences of purchases in credit card data reveal lifestyles in urban populations. *Nature Communications*, 9(1), 3330. https://doi.org/10.1038/s41467-018-05690-8

Dolega, L., Pavlis, M., y Singleton, A. (2016). Estimating attractiveness, hierarchy and catchment area extents for a national set of retail centre agglomerations. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 28, 78–90. https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2015.08.013

Esselink, H., y Hernández, L. (2017). The use of cash by households in the euro area (No 201 / November 2017; *Ocassional Paper Series*). https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/scpops/ecb.op201.en.pdf

European Central Bank. (2020). Study on the payment attitudes of consumers in the euro area (SPACE). https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/other/ecb.spacereport202012~bb2038bbb6.en.pdf

Fleury, A., Mathian, H., y Saint-Julien, T. (2012). Définir les centralités commerciales au cœur d'une grande métropole: le cas de Paris intra-muros. Cybergeo : *European Journal of Geography*, 588. https://doi.org/10.4000/cybergeo.25107

Getis, A., y Ord, J. K. (1992). The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. Geographical Analysis, 24(3), 189–206. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x

Guy, C. M. (1984). The urban pattern of retailing: within the UK. In R. L. Davies y D. S. Rogers (Eds.), *Store Location and Store Assessment Research.* Wiley.

Guy, C. M. (1998). Classifications of retail stores and shopping centres : some methodological issues. *GeoJournal*, 45(4), 255–264. http://www.jstor.org/stable/41147255

Hashemian, B., Massaro, E., Bojic, I., Murillo Arias, J., Sobolevsky, S., y Ratti, C. (2017). Socioeconomic characterization of regions through the lens of individual financial transactions. *PLoS ONE*, 12(11), e0187031. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187031

Hotelling, H. (1929). Stability in Competition. *The Economic Journal*, 39(153), 41–57. https://doi.org/10.2307/2224214

Hoyt, H. (1939). The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities. Federal Housing Administration.

Hui, T.-K., y Wan, D. (2007). Factors affecting Internet shopping behaviour in Singapore: gender and educational issues. *International Journal of Consumer Studies*, 31(3), 310–316. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1470-6431.2006.00554.x

Jacobs, J. (1961). *The Death and Life of Great American Cities*. Random House.

Koster, H.R.A., Pasidis, I., y van Ommeren, J. (2019). Shopping externalities and retail concentration: evidence from Dutch shopping streets. *Journal of Urban Economics*, 114, 103194.

Krumme, C., Llorente, A., Cebrian, M., Pentland, A. ("Sandy"), y Moro, E. (2013). The predictability of consumer visitation patterns. *Scientific Reports*, 3(1), 1645. https://doi.org/10.1038/srep01645

Lenormand, M., Louail, T., Cantú-Ros, O. G., Picornell, M., Herranz, R., Arias, J. M., Barthelemy, M., Miguel, M. S., y Ramasco, J. J. (2015). Influence of sociodemographic characteristics on human mobility. *Scientific Reports*, 5(10075), 190–198. https://doi.org/10.1038/srep10075

Lloyd, R., y Jennings, D. (1978). Shopping Behavior and Income: Comparisons in an Urban Environment. *Economic Geography*, 54(2), 157–167. https://doi.org/10.2307/142850

López de Lucio, R., González, F. J., Parrilla Gorbea, E., Ruiz Sánchez, J., y Ruiz Sánchez, T. (1996). Centros urbanos frente a nuevas centralidades comerciales. Un análisis del sur metropolitano de Madrid. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 14.

López de Lucio, R., y Parrilla Gorbea, E. (2006). Espacio público e implantación comercial en la ciudad de Madrid. Calles comerciales versus grandes superficies. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 23.

Marquet, O., y Miralles-Guasch, C. (2014). Walking short distances. The socioeconomic drivers for the use of proximity in everyday mobility in Barcelona. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 70, 210–222. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.10.007

Martí, P., Serrano-Estrada, L., y Nolasco-Cirugeda, A. (2019). Social Media data: Challenges, opportunities and limitations in urban studies. Computers, *Environment and Urban Systems*, 74, 161–174. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.11.001

Mitchell, A. (2005). *The ESRI Guide to GIS analysis. Volume 2: Spatial Measurements and Statistics*. ESRI Press.

Ortúzar, J. de D., y Willumsen, L. G. (1990). *Modelling Transport*. John Wiley y Sons.

Salas-Olmedo, M. H., Moya-Gómez, B., García-Palomares, J. C., y Gutiérrez, J. (2018). Tourists' digital footprint in cities: Comparing Big Data sources. *Tourism Management*, 66, 13–25. https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.11.001

Sevtsuk, A. (2010). Path and Place: A study of Urban Geometry and Retail Activity in Cambridge and Somerville, MA. In *PhD dissertation*. Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Sobolevsky, S., Sitko, I., des Combes, R., Hawelka, B., Murillo Arias, J., y Ratti, C. (2016). Cities through the Prism of People's Spending Behavior. *PLOS ONE*, 11(2), 1–19. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146291

Sobolevsky, S., Sitko, I., Grauwin, S., Combes, R. T. des, Hawelka, B., Arias, J. M., y Ratti, C. (2014). Mining Urban Performance: Scale-Independent Classification of Cities Based on Individual Economic Transactions. *ArXiv*, abs/1405.4. http://arxiv.org/abs/1405.4301

van Loon, R., y Rouwendal, J. (2017). Travel purpose and expenditure patterns in city tourism: evidence from the Amsterdam Metropolitan Area. *Journal of Cultural Economics*, 41(2), 109–127. https://doi.org/10.1007/s10824-017-9293-1

Wicker, P., Hallmann, K., y Zhang, J. J. (2012). What is influencing consumer expenditure and intention to revisit? An investigation of marathon events. *Journal of Sport \y Tourism*, 17(3), 165–182. https://doi.org/10.1080/14775085.2012.734058

Yoshimura, Y., Santi, P., Arias, J. M., Zheng, S., y Ratti, C. (2020). Spatial clustering: Influence of urban street networks on retail sales volumes. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 48(7), 1926–1942. https://doi.org/10.1177/2399808320954210

BIG DATA Y MODELADO

Técnicas de aprendizaje artificial (*Machine learning*) aplicadas al modelado espacial: tratamiento masivo de datos LiDAR, modelos regionales y globales, teledetección...



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 127-135

Creación de una base de datos espacial de los edificios del País Vasco y desagregación de la población

I. Álvarez González[1], L. Garmendia Arrieta[2], L. Quesada-Ganuza[2], E. Briz Blanco[2], Z. Egiluz Ellakuria[2], A. Villaverde García[2]

[1] Departamento de Expresión Gráfica y Proyectos de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). C. Rafael Moreno 'Pitxitxi' 3, 48.013 Bilbao.
[2] Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). P. Ingeniero Torres Quevedo 1, 48.013 Bilbao.

irantzu.alvarez@ehu.eus, leire.garmendia@ehu.eus, laura.quesada@ehu.eus , estibaliz.briz@ehu.eus , ziortza.egiluz@ehu.eus , ane.villaverde@ehu.eus .

RESUMEN: Una correcta caracterización del parque edificado es fundamental en los análisis de los riesgos directos e indirectos relacionados con el Cambio Climático. Según el IPCC los riesgos deben ser valorados en función de la vulnerabilidad, la exposición y la capacidad de adaptación y, por lo tanto, conocer la población vulnerable, sus características y su distribución es un paso clave en la modelización de los riesgos y en el establecimiento de las estrategias necesarias para su adaptación. En este trabajo se ha creado una base de datos espacial de todos los edificios residenciales del País Vasco, partiendo de los datos abiertos de sus tres catastros (Bizkaia, Gipuzkoa y Álava). A esa base datos se le ha incorporado el dato de la población residente en cada edificio, partiendo de la información existente a nivel de sección censal y haciendo uso de técnicas de *downscaling*. Esta base datos servirá de base para realizar, en trabajos posteriores, diferentes análisis de evaluación de la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación de los edificios ante los riesgos cada vez más frecuentes como las olas de calor, la subida del nivel del mar o las inundaciones. Este conocimiento permitirá fortalecer la resiliencia y adaptación a los riesgos climáticos del parque edificado.

Palabras-clave: edificios, catastro, downscaling, cambio climático.

1. INTRODUCCIÓN

La información detallada de la distribución de la población puede ser clave en estudios relacionados con el planeamiento urbano, la gestión de riesgos naturales o el transporte. Habitualmente, la información espacial relacionada con la población suele estar disponible de forma agregada a escala de municipio, distrito o sección censal, ya que la información con un mayor nivel de desagregación está sujeta al secreto estadístico. Por tanto, la información socioeconómica suele estar, en el mejor de los casos, a nivel de sección censal, lo que permite realizar estudios con cierto nivel de detalle. Sin embargo, estas unidades no reflejan la heterogeneidad que puede haber dentro de las mismas.

En el caso de los estudios relacionados con el impacto de los fenómenos climáticos extremos debidos al Cambio Climático, la distribución de la población es una variable fundamental. Efectivamente, el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) establece que los riesgos deben ser valorados en función de la vulnerabilidad, la exposición y la capacidad de adaptación (IPCC, 2014) y, por lo tanto, conocer la población vulnerable, sus características y su distribución es un paso clave en la modelización de los riesgos y en el establecimiento de las estrategias necesarias para su adaptación. Actualmente se dispone de varios conjuntos de datos de población con una alta resolución espacial, tanto a nivel europeo (Leyk et al., 2019) como a nivel de España (Gallego, 2010; Goerlich y Cantarino, 2013 y 2012). Además, se están llevando a cabo trabajos que permiten conocer la distribución espacial de la población de forma actualizada, utilizando datos de teléfonos móviles o imágenes satélite (Cheng et al., 2022; Wan et al., 2022).

Existen múltiples ejemplos de estudios de cálculo de la vulnerabilidad ante diferentes tipos de riesgos tomando como unidad de análisis el edificio, como los riesgos asociados a seísmos (Mesgar y Jalilvand, 2017), a inundaciones (Amadio et al., 2019; Gandini et al., 2020; Pérez-Morales et al., 2022), riesgos costeros (Valero

y de Lamo, 2021), a la vulnerabilidad socioeconómica (de Cos y Usobiaga, 2019), ante diferentes riesgos medioambientales (Nelson et al., 2015). o a la contaminación atmosférica (Frutos et al., 2019). También se utilizan los datos de la distribución de la población utilizando como unidad de análisis el edificio en estudios relacionados con la eficiencia energética (Martin-Consuegra et al., 2018).

Pero en estudios donde el objeto de análisis no es la distribución poblacional, sino el propio edificio, es necesario conocer la población residente en cada edificio con la mayor precisión posible, debido a que su vulnerabilidad y capacidad de adaptación dependerá de cuántas personas residan en el mismo y de sus características sociodemográficas (nivel de renta y tramos de edad). Es por ello que la desagregación del dato de población de unidades administrativas (distritos o unidades censales) a edificios es una tarea fundamental en el análisis de riesgos.

Para la desagregación de los datos de población a nivel de edificio se debe hacer uso de técnicas de *downscaling* o enfoque *top-down* (Maantay et al., 2007; Lwin y Muruyama, 2009; Mora-García y Martí-Ciriquian, 2015). Según Cantarino y Goerlich (2013) estos métodos consisten en "transferir los datos de una zona de origen a varias zonas de destino, cuando estas constituyen una partición de la primera". Es decir, la información de las unidades espaciales delimitadas por la administración pública se desagrega en otras de mayor resolución y precisión espacial, como es el caso de la desagregación a nivel de parcela catastral o edificio (Santos Preciado, 2015).

La publicación en abierto de la información del catastro ofrece una fuente de datos de indudable valor para el análisis de las zonas urbanas. En España, la Dirección General de Catastro gestiona el catastro de todo el territorio excepto el País Vasco y Navarra. Por ello, estudios de ámbito nacional, en muchos casos, sufren esta dispersión de datos y no pueden llevarse a cabo en la totalidad del territorio (Arribas-Bel et al., 2021). La información pública del catastro contiene la información de todas las viviendas (y otro tipo de elementos) existentes en un edificio y que están sujetos al pago de los impuestos correspondientes. La información accesible de forma abierta incluye la superficie de la vivienda y el número de planta en la que se sitúa, por lo que es posible realizar una desagregación de la población en 3D asignando valores de población a cada planta del edificio (Maroko et al., 2019; Pérez-Morales et al., 2022).

En este trabajo se pretende, por un lado, realizar un esfuerzo de unificación de los datos de los tres catastros vascos para la creación de una única base de datos de edificios y, por otro, completar esa base datos con datos de población mediante técnicas de desagregación o *downscaling* a nivel de edificio. Esa nueva capa de información servirá de base para posteriores trabajos análisis de evaluación de la vulnerabilidad y capacidad de adaptación del parque edificado del País Vasco y, por lo tanto, que sirva para establecer las estrategias de mitigación y adaptación más adecuadas.

2. LOS DATOS

Las fuentes de datos utilizadas para la creación de la base de datos han sido los servicios de catastro de las tres diputaciones vascas (Bizkaia, Gipuzkoa y Álava). La gestión del Catastro en el País Vasco es una competencia de las Diputaciones Forales y, por tanto, existen tres catastros diferentes y cada una de ellas la gestiona de forma independiente. Ello supone un esfuerzo añadido a la hora de crear una base de datos unificada, debido a que cada una de las diputaciones estructura la información de forma diferente. A modo de ejemplo, la unidad de información básica en el caso de Bizkaia se denomina “elemento”, en el de Gipuzkoa “local” y en el caso de Álava “unidad fiscal” y estas se relacionan con el resto de elementos de forma diferente. Estas unidades básicas de información son las que están sujetas al pago de impuestos. A partir de los ficheros descargados se ha creado una sola base de datos de todos los edificios residenciales, agrupando las viviendas por edificio y calculando los valores necesarios para, posteriormente, calcular el dato de la población residente en cada edificio. La base de datos final cuenta con 182.128 edificios. A continuación, se describen brevemente los pasos seguidos con la información de cada uno de los territorios (Figura 1).

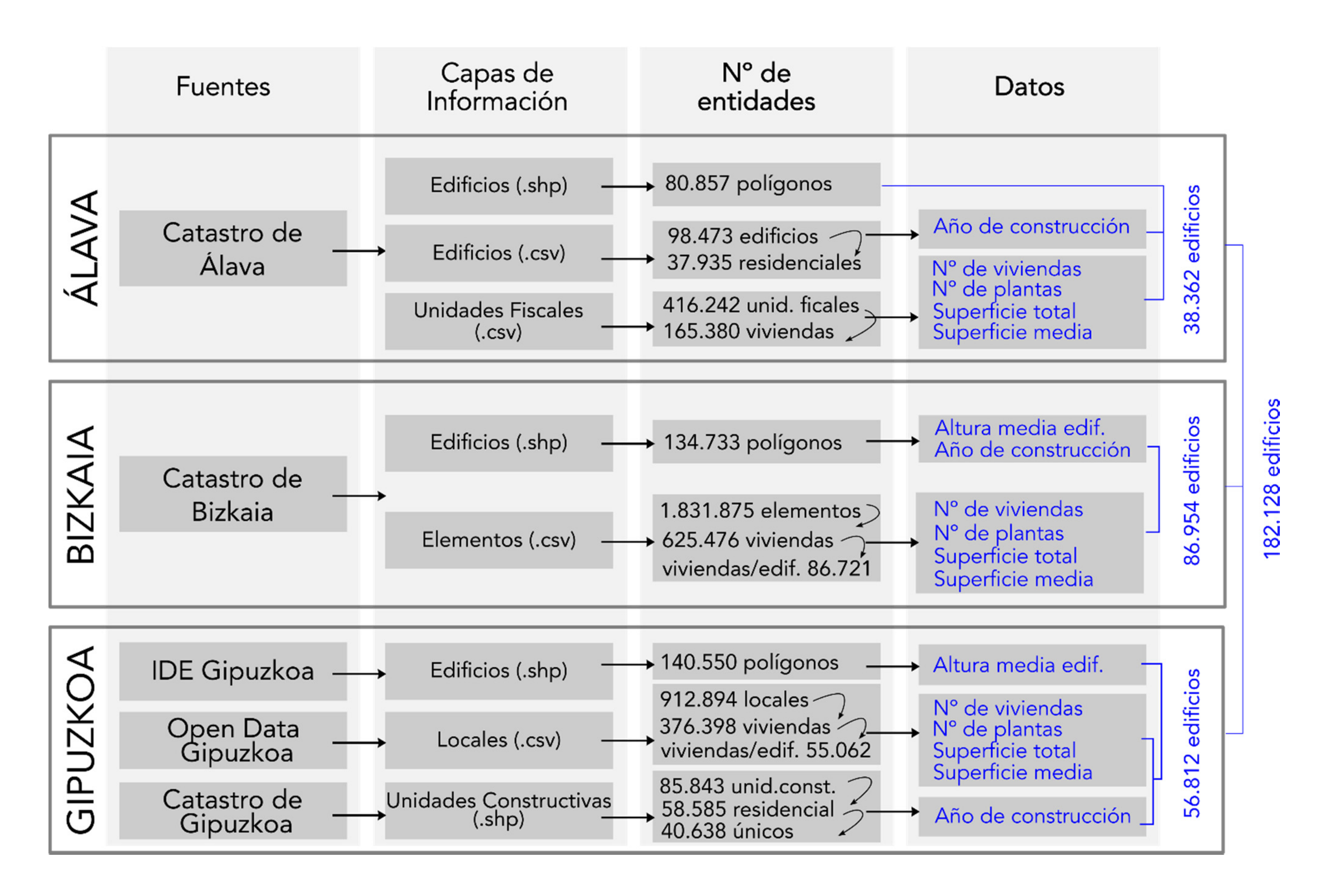


Figura 1: Resumen de los datos, las fuentes y la estructura básica de la información (elaboración propia).

2.1. Álava

Para crear la base de datos de Álava la información se obtiene del servicio de Catastro de la Diputación Foral de Álava[1]. De ahí se descargan los datos de cada uno de los 53 municipios, que se divide en información gráfica y alfanumérica. De la información gráfica se extraen los edificios, y de la información alfanumérica se extraen los datos relativos a los edificios residenciales y a las unidades fiscales relativas a viviendas. Una vez hecha la unión de las tres capas, se obtiene una capa de edificios con la información del número de viviendas, número de plantas, superficie, total de las viviendas y la superficie media de las viviendas. Cabe mencionar que en este caso no es posible obtener el dato de la altura de los edificios.

2.2. Bizkaia

Para crear la base da datos de edificios de Bizkaia toda la información necesaria se puede descargar del servicio de catastro de la Diputación Foral de Bizkaia[2]. En esa página se encuentra la información gráfica y alfanumérica de los 112 municipios del territorio. En cuanto a la información gráfica, se facilitan datos del límite municipal, los polígonos, parcelas, subparcelas, edificios, elementos y elementos secundarios. En este caso, solo será necesaria la capa de los edificios. A su vez, en la información alfanumérica, se obtiene información de todos los Bienes Inmuebles calificados como viviendas. Se agrupan por edificio y se obtiene así, el

[1] Catastro de la Diputación Foral de Álava: https://catastroalava.tracasa.es/
[2] Catastro de la Diputación Foral de Bizkaia: https://web.bizkaia.eus/es/catastro-de-bizkaia

número de viviendas, el número de plantas y las superficies totales y medias. De la información gráfica relativa a los edificios, se obtiene el año de construcción de los edificios. En esta capa de edificios tampoco es posible obtener la altura de los edificios.

2.3. Gipuzkoa

Para crear la base de datos de edificios de Gipuzkoa es necesario descargar por un lado, la capa con las huellas de los edificios de la IDE de Gipuzkoa[3], de donde se obtiene la altura de los edificios y, por otro, desde el catálogo de datos abiertos de la Diputación Foral de Gipuzkoa[4], se descargan los ficheros correspondientes a los Bienes de Naturaleza Urbana de cada uno de los 91 municipios del territorio histórico. De cada municipio, se descargan los datos de los bienes de naturaleza urbana, que se dividen, a su vez, en locales y parcelas. Del fichero de los locales (que hacen referencia a las viviendas, comercios, edificios, industriales, garajes, trasteros, etc.), se extraen las viviendas y con ellas, se obtiene otra tabla con las viviendas agrupadas por edificio. Así, se puede calcular el número de viviendas en cada edificio, el número de plantas (con al menos alguna vivienda), la superficie total y la superficie media de las viviendas de cada edificio.

Por último, del servicio de Catastro de Gipuzkoa, se obtienen las unidades constructivas. Una o más unidades constructivas pueden ser parte de un solo edificio y varios edificios pueden formar una sola unidad constructiva. En esta capa está la información del año de construcción de la unidad, por lo que posteriormente, ese valor es asignado al edificio.

Una vez creadas las bases de datos de los tres territorios históricos, se han unido en una sola que contiene 182.128 edificios.

2.4. Datos de población

Los datos de población desagregados a la escala de la sección censal se han obtenido del Instituto Vasco de Estadística (Eustat). Se trata de datos de la Estadística Municipal de Habitantes, que utiliza como principal fuente los registros administrativos del Padrón Municipal de Habitantes[5]. Los datos utilizados están referidos al año 2021.

3. METODOLOGÍA

3.1. Creación de la base de datos de edificios del País Vasco

Una vez creadas las bases de datos de las tres provincias, se han unido en una sola que tiene todos los edificios que contienen al menos una vivienda (edificios residenciales, aunque puedan albergar a su vez otros usos). A estos edificios se les ha añadido la información del número de viviendas, el número de plantas del edificio, la superficie total dedicada a viviendas y la superficie media de las mismas, datos deducidos de los datos de catastro.

Además de la información deducida directamente de los datos de catastro mediante herramientas de filtrado y agrupación, se han calculado el área de la huella de los edificios y su altura. Esta última se ha calculado multiplicando el número de plantas por tres. La información de los edificios de Gipuzkoa incorporan el dato de la altura media de los edificios, en el caso de Bizkaia incluye el número de alturas sobre rasante y en el caso de Álava no se incluye esa información. Por lo tanto, para unificar la información se ha optado por calcular la altura a partir del número de plantas[6].

---

[3] IDE de Gipuzkoa: https://b5m.gipuzkoa.eus/web5000/es

[4] Datos Abiertos de Gipuzkoa: https://www.gipuzkoairekia.eus/es/hasiera

[5] Estadística Municipal de Habitantes del Eustat: https://www.eustat.eus/estadisticas/tema_268/opt_1/tipo_1/ti_estadistica-municipal-de-habitantes/temas.html

[6] En una fase posterior del proyecto está previsto calcular la altura de todos los edificios utilizando datos LiDAR disponibles en la IDE del Gobierno Vasco (Geoeuskadi).

3.2. Downscaling de datos de población

Existen diversos métodos para desagregar la información de la población desde las unidades censales a los edificios (Maantay et al., 2007; Mora-Garcia y Martí-Ciriquian, 2015). Entre ellas, destacan los métodos basados en el área ocupada por el edificio o basados en el volumen (Lwin y Muruyama, 2009). Estos dos métodos son relativamente sencillos ya que para su cálculo solo es necesario el dato del área ocupada por el edificio y su altura. El primero funcionaría mejor en zonas de baja densidad edificatoria y el segundo en zonas con edificios más altos (Lwin y Muruyama, 2009). Otros métodos, han intentado mejorar los anteriores, utilizando el techo edificable residencial como criterio de reparto de la población (Gálvez Salinas et al., 2014).

El cálculo de la población residente en cada edificio en función del área de la huella del edificio se haría siguiendo la siguiente fórmula (1):

$$Población_{edificio_i} = (Población\ Sección\ Censal * Area_{Edificio_i} / \sum_{k=1}^{n} Area_{edificio_k}) \quad (1)$$

Para el cálculo de la población en función del volumen del edificio se utiliza la siguiente fórmula (2), teniendo en cuenta que el volumen se calcula multiplicando el área de la huella por la altura:

$$Población_{edificio_i} = (Población\ Sección\ Censal * Volumen_{Edificio_i} / \sum_{k=1}^{n} Volumen_{edificio_k}) \quad (2)$$

Maantay et al. (2007) proponen otro método denominado *Cadastral-based Expert Dasymetric System* (CEDS) y que mejora el cálculo basado en áreas y volúmenes. Partiendo de datos catastrales crean una imagen más precisa de la distribución de la población. La técnica utiliza el número de unidades residenciales (viviendas) y la superficie residencial como criterios para desagregar el dato de población, considerando que donde hay más viviendas habrá más habitantes (no se tiene en cuenta si una vivienda está vacía). Mora-Garcia y Martí-Ciriquian (2015) aplicaron este método para la desagregación de la población desde las secciones censales a las parcelas catastrales en Elche (Alicante). En ese trabajo concluyeron que el cálculo utilizando tanto el número de viviendas como la superficie es válido y se correlacionan con la población, siendo esa correlación mayor en el caso del número de viviendas (aunque la diferencia entre ambas variables no llega a ser significativa).

Pero además del área y el volumen, la información del catastro permite conocer el número de viviendas la superficie total de estas. Por ello, siguiendo el método utilizado por (Mora-García y Martí-Ciriquian) para las parcelas catastrales (2015), es posible mejorar el cálculo utilizando estos datos:

Las fórmulas utilizadas para la desagregación de la población por edificio se detallan a continuación: la ecuación (3) cuando se emplea el número de viviendas y la ecuación (4) cuando la variable utilizada en la superficie destinada a viviendas en cada edificio:

$$Población_{edificio_i} = (Población\ Sección\ Censal * Nun.Viv._{Edificio_i} / \sum_{k=1}^{n} Num.Viv_{edificio_k}) \quad (3)$$

$$Población_{edificio_i} = (Población\ Sección\ Censal * Sup.Viv_{Edificio_i} / \sum_{k=1}^{n} Sup.Viv_{edificio_k}) \quad (4)$$

En este trabajo, se ha optado, por tanto, por seguir el método de Maantay et al. (2007) y Mora-Garcia y Martí-Ciriquian (2015) debido a relativa facilidad para conseguir los datos necesarios para el cálculo y su mayor precisión en la desagregación poblacional. Cabe señalar que, en este caso, se ha dado un paso más en el nivel de detalle, asignando el valor de la población al edificio y no a la parcela catastral.

Asimismo, este trabajo supone un avance en la creación de este tipo de bases de datos al abarcar los datos de toda la Comunidad Autónoma del País Vasco. Esto ha supuesto un reto añadido debido a la necesidad de integrar diferentes estructuras de datos y al propio volumen de los datos.

4. RESULTADOS

La base de datos final está compuesta de 182.128 edificios y en todos ello se dispone de la información del número de viviendas, altura, volumen, superficie y población residente (Figura 2).

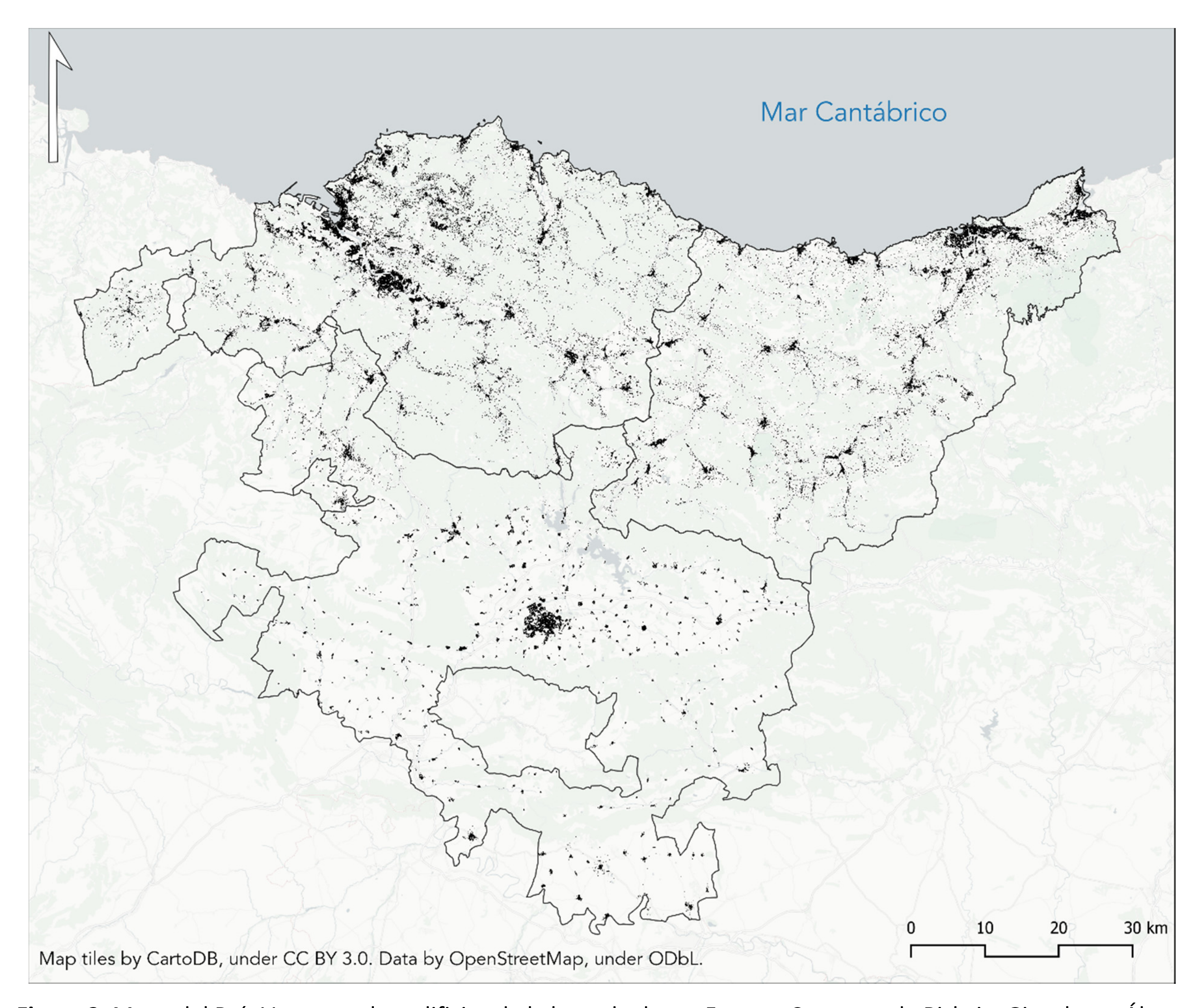


Figura 2: Mapa del País Vasco con los edificios de la base de datos. Fuente: Catastros de Bizkaia, Gipuzkoa y Álava.

En la tabla siguiente se muestran los datos de la base de datos creada (Tabla 1). De todos los edificios, el 47,7% están ubicados en Bizkaia, un 31,2% en Gipuzkoa y 21,1% en Álava. El promedio del número de viviendas por edificio es de 3, y el número de plantas de 2, (aunque el rango va de una planta a 29). La superficie media de las viviendas es de 85,65 m^2, siendo en Álava las viviendas más grandes (en el territorio de Álava abundan los edificios unifamiliares). La población total es de 2.186.754, siendo la media del número de residentes por edificio de 4,24 habitantes (aunque varía de 0 a 432 habitantes). Según los datos, el parque edificado en el País Vasco tiene una antigüedad media de 50 años.

Tabla 1. Resumen de los datos

	ÁLAVA	*BIZKAIA*	*GIPUZKOA*	*PAÍS VASCO*
Nº de edificios	38.362	86.954	56.812	182.128
Nº de viviendas	165.380	625.476	376.398	1.167.254
Promedio del nº de viviendas/edificio	1	3	4	3
Promedio del nº de plantas/edificio	1	3	3	2
Superficie media de las viviendas (m^2)	129,61	82,4	76,4	85,64
Población total	330.099	1.144.205	712.450	2.186.754
Población media por edificio	1,9	6,4	4,4	4,24
Año medio de construcción de los edificios	1976	1967	1972	1970

Con estos datos es posible realizar una caracterización exhaustiva del parque edificado. Se puede conocer la edad de los edificios (Figura 3) y, por lo tanto, conocer su evolución, o ver dónde se concentra la mayor cantidad de población a un nivel de detalle superior al de la sección censal.

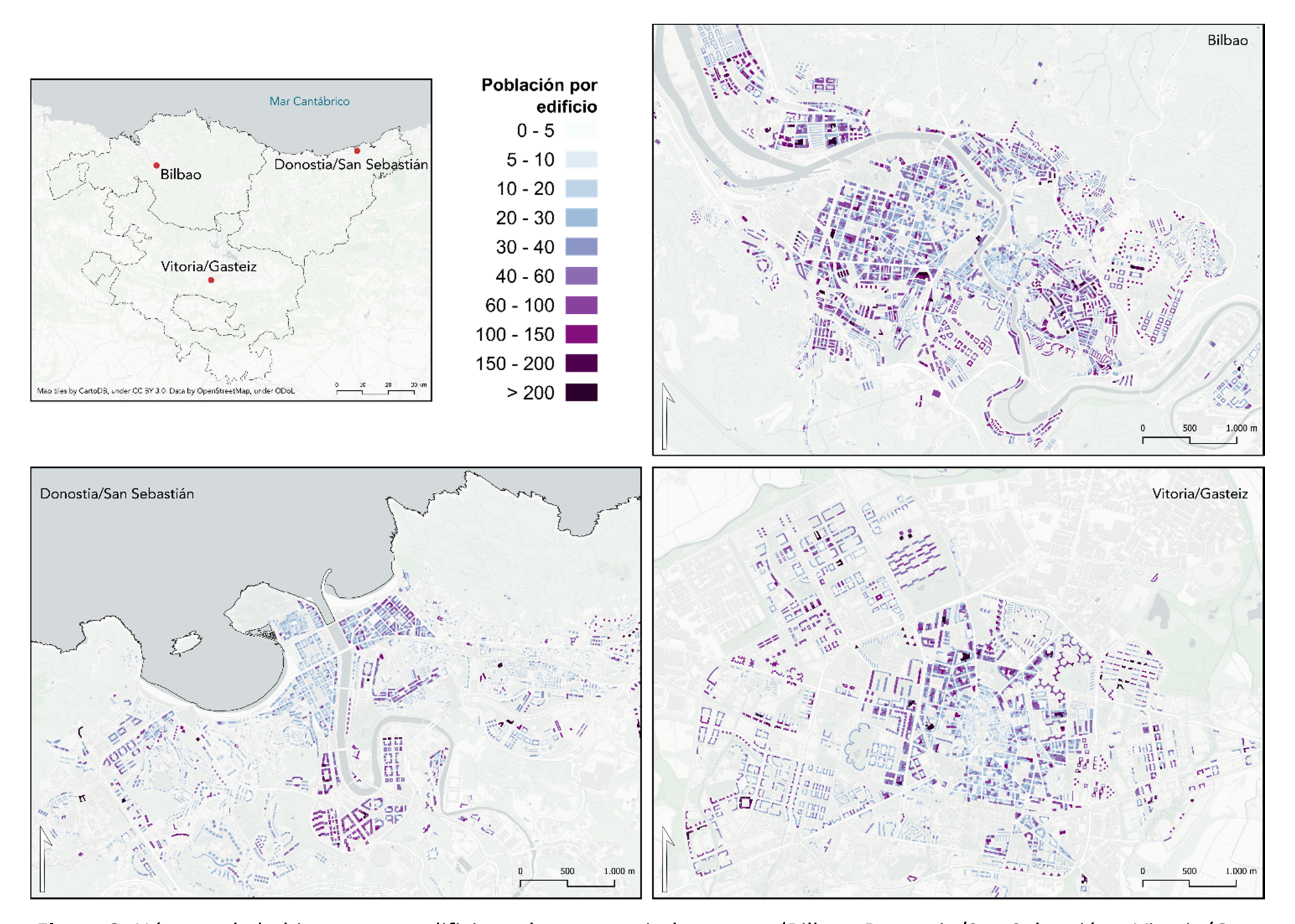


Figura 3: Número de habitantes por edificio en las tres capitales vascas (Bilbao, Donostia/San Sebastián y Vitoria/Gasteiz). Fuente: Catastro de Bizkaia, Gipuzkoa y Álava. Elaboración propia.

5. CONCLUSIÓN

La creación de capas de información con la distribución de la población es una tarea importante en los estudios relacionados con el análisis de riesgos, pero las administraciones públicas facilitan esta información de forma agregada, debido a la necesidad de mantener el secreto estadístico.

En este trabajo se ha creado una base de datos de todos los edificios residenciales del País Vasco. Se han utilizado datos de los tres catastros vascos, lo que ha supuesto un reto en sí mismo debido a que la información está estructura de diferente manera en cada caso. A esa base de datos se le ha añadido la información de la población por edificio, haciendo el cálculo en función del número de viviendas y la superficie de las viviendas. Así, se ha obtenido una base de datos espacial con la información del año de construcción de los edificios, el número de viviendas, el número de plantas y la población residente.

Esta base de datos se puede ampliar con datos relacionados con la geometría del propio edificio (superficie de fachada principal, orientación, altura calculada a partir de datos LiDAR, etc.), datos de su entorno (datos relativos al clima) o datos de carácter socioeconómico (nivel de renta o tramos de edad de los habitantes) para poder así realizar el cálculo de la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación de los edificios con mayor precisión. Este tipo de información es fundamental para la caracterización y el conocimiento exhaustivo del parque edificado y poder así establecer estrategias para su protección.

Se ha comprobado que la información pública del catastro puede ser una fuente de gran valor para los estudios relacionados con el parque edificado y el análisis de su vulnerabilidad ante los retos del Cambio

Climático. Este conocimiento permitirá fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación del parque edificado ante los riesgos climáticos.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras quieren expresar su agradecimiento al grupo de investigación SAREN Research Group [IT1619-22, Gobierno Vasco] de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU).

6. BIBLIOGRAFÍA

Amadio, M., Mysiak, J. y Marzi, S. (2019). Mapping socioeconomic exposure for flood risk assessment in italy. *Risk Analysis*, 39(4), 829-845.

Arribas-Bel, D., Garcia-López, M.A. y Viladecans-Marsal, E. (2021). Building(s and) cities: Delineating urban areas with a machine learning algorithm. *Journal of Urban Economics, 125*, 103217. https://doi.org/10.1016/j.jue.2019.103217

Cantarino Martí, I. y Goerlich Gisbert, F. (2013). Un modelo de distribución de población para España. GeoFocus. *Revista Internacional De Ciencia Y Tecnología De La Información Geográfica*, 13(1), 246-269.

Cheng, Z., Wang, J. y Ge, Y. (2022). Mapping monthly population distribution and variation at 1-km resolution across china. *International Journal of Geographic Information Science,* 36(6), 1166-1184. http://doi.org/10.1080/13658816.2020.1854767

de Cos Guerra, O. y Usobiaga Ferrer, E. (2019). Retos metodológicos para estudiar la vulnerabilidad demográfica y residencial a nivel intraurbano ante los cambios en las fuentes estadísticas habituales. *Scripta Nova*, Vol. 23, Num. 606.

Frutos Borja, B., Martin-Consuegra, F., Alonso, C., de Frutos, F., Sanchez, V. y Garcia-Talavera, M. (2019). Geolocation of premises subject to radon risk: Methodological proposal and case study in Madrid. *Environmental Pollution*, 247, 556-563.

Gallego, F. J. (2010). A population density grid of the European Union. *Population and Environment*, 31(6), 460-473.

Gálvez Salinas, J. A., Fischer, J. y Valenzuela Montes, L. M. (2014). Metodología para la desagregación espacial de la información demográfica, en ámbitos urbanos, mediante la elaboración de unidades espaciales modificables. *GeoFocus. Revista Internacional De Ciencia Y Tecnología De La Información Geográfica*, (13_1), 337–366. Recuperado a partir de https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/282

Gandini, A., Garmendia, L., Prieto, I., Álvarez, I. y San-José, J. (2020). A holistic and multi-stakeholder methodology for vulnerability assessment of cities to flooding and extreme precipitation events. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102437. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102437

Goerlich, F. J. y Cantarino, I. (2013). A population density grid for Spain. *International Journal of Geographical Information Science,* 27(12), 2247-2263. http://doi.org/10.1080/13658816.2013.799283,

Goerlich, G. F. J. y Cantarino, M. I. (2012). Una grid de densidad de población para España. Fundación BBVA. Bilbao.

IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Leyk, S., Gaughan, A. E., Adamo, S. B., de Sherbinin, A., Balk, D., Freire, S., . . . Frye, C. (2019). The spatial allocation of population: A review of large-scale gridded population data products and their fitness for use. *Earth System Science Data*, 11(3), 1385-1409.

Lwin, K. y Murayama, Y. (2009). A GIS approach to estimation of building population for micro-spatial analysis. *Transactions in GIS,* 13(4), 401-414.

Maantay, J. A., Maroko, A. R. y Herrmann, C. (2007). Mapping population distribution in the urban environment: The cadastral-based expert dasymetric system (CEDS). *Cartography and Geographic Information Science*, 34(2), 77-102.

Maroko, A., Maantay, J., Pérez Machado, R. P. y Barrozo, L. V. (2019). Improving population mapping and exposure assessment: Three-dimensional dasymetric disaggregation in New York city and São Paulo, Brazil. *Papers in Applied Geography, 5*(1-2), 45-57. http://doi.org/10.1080/23754931.2019.1619092

Martin-Consuegra, F., de Frutos, F., Oteiza San José, I. y Hernández-Aja, A. (2018). Use of cadastral data to assess urban scale building energy loss. Application to a deprived quarter in Madrid. *Energy and Buildings*, 171, 50-63.

Mesgar, M. A. A. y Jalilvand, P. (2017). Vulnerability analysis of the urban environments to different seismic scenarios: Residential buildings and associated population distribution modelling through integrating dasymetric mapping method and GIS. *Procedia Engineering*, 198, 454-466. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.100

Mora-García, R. T. y Martí-Ciriquian, P. (2015). Desagregación poblacional a partir de datos catastrales. *Análisis Espacial Y Representación Geográfica: Innovación Y Aplicación*, 305-314.

Nelson, K. S., Abkowitz, M. D. y Camp, J. V. (2015). A method for creating high resolution maps of social vulnerability in the context of environmental hazards. *Applied Geography*, 63, 89-100. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.06.011

Pérez-Morales, A., Gil-Guirado, S. y Martínez-García, V. (2022). Dasymetry dash flood (DDF). A method for population mapping and flood exposure assessment in touristic cities. *Applied Geography*, 142, 102683. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102683

Santos Preciado, J. M. (2015). La cartografía catastral y su utilización en la desagregación de la población. Aplicación al análisis de la distribución espacial de la población en el municipio de Leganés (Madrid). *Estudios Geográficos*, 76(278), 309–333. https://doi.org/10.3989/estgeogr.201511

Rubinyi, S., Blankespoor, B., y Hall, J. W. (2021). The utility of built environment geospatial data for high-resolution dasymetric global population modeling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 86, 101594. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101594

Tenerelli, P., Gallego, J. F. y Ehrlich, D. (2015). Population density modelling in support of disaster risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 13, 334-341.

Valero, N. F. y de Lamo, G. H. (2021). Estimación de la distribución de población en el análisis de riesgos costeros asociados al cambio climático en Canarias. En *Geografía, Cambio Global Y Sostenibilidad. Comunicaciones Del XXVII Congreso De La Asociación Española De Geografía*.: Tomo I: Naturaleza, Transformación Territorial y Paisaje, 555-566. Asociación Española de Geografía

Wan, H., Yoon, J., Srikrishnan, V., Daniel, B. y Judi, D. (2022). Population downscaling using high-resolution, temporally-rich U.S. property data. *Cartographic and Geographic Information Science,* 49(1), 18-31. http://doi.org/10.1080/15230406.2021.1991479



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 136-143

Modelado del Índice de Sitio utilizando datos multi-temporales LiDAR-PNOA en masas de *Pinus halepensis* Mill.

D. Domingo[1,2,3], R. Alonso Ponce[4,3], M.T. Lamelas[5,1], J. de la Riva[1], F. Rodríguez[2,3], A.L. Montealegre[5,1], A. García-Martín[5,1]

[1] Geoforest-IUCA, Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12,50009 Zaragoza España.
[2] EiFAB Campus Universitario Duques de Soria, Universidad de Valladolid, 42004 Soria.
[3] Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), Universidad de Valladolid-INIA, Soria, España.
[4] föra forest technologies SLL, Campus Duques de Soria, Soria, España.
[5] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, Zaragoza, España.

ddomingo@unizar.es, rafa.alonso@fora.es, tlamelas@unizar.es, delariva@unizar.es, francisco.rodriguez.puerta@uva.es, monteale@unizar.es, algarcia@unizar.es

RESUMEN: El potencial de producción de madera para una especie y un territorio dado suele ser evaluado en masas regulares, de forma directa, mediante el Índice de Sitio. El objetivo del presente estudio es estimar el Índice de Sitio utilizando un enfoque directo en masas de *Pinus halepensis* Miller del sector central de la Depresión del Ebro (Aragón) mediante datos multitemporales LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). La metodología se basa en la utilización de dos criterios de selección de variables, correlación de Spearman y selección por todos los subconjuntos, así como en el uso del método de regresión no paramétrico Support Vector Machine (SVM), para predecir el Índice de Sitio, estimado a partir de la información capturada en 151 parcelas de campo mediante las curvas de Rojo-Alboreca et al. (2017), utilizando un conjunto de métricas independientes derivadas de dos coberturas LiDAR. La validación de los modelos se realizó reservando el 25% de la muestra, mediante el error cuadrático medio (RMSE), el porcentaje del RMSE con respecto a la media (% RMSE) y el promedio de los residuos (sesgo). Los resultados demuestran la idoneidad de los datos multi-temporales LiDAR-PNOA de baja densidad para estimar el Índice de Sitio utilizando un enfoque directo en masas de *Pinus halepensis* repobladas o naturales con un error cuadrático de 16,47% respecto a la media utilizando un modelo SVM con kernel radial. Así, este trabajo contribuye a mejorar la predicción del crecimiento de dichas masas forestales, proporcionando información relevante para su planificación y gestión silvícola, contribuyendo de esta forma a lograr la meta 12.2 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible: la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.

Palabras-clave: calidad de estación, pinares mediterráneos, LiDAR, planificación selvícola.

1. INTRODUCCIÓN

La estimación de la productividad forestal de madera es esencial para la planificación de la gestión forestal, estando influenciada por la especie de árbol principal, las condiciones ambientales y de manejo de la masa (Skovsgaard & Vanclay, 2008). La calidad de estación se refiere a la capacidad productiva de un área concreta para una especie dada, siendo el Índice de Sitio (IS) el indicador más comúnmente utilizado para medir dicha capacidad productiva, definido como la altura dominante de los pies a una determinada edad para una especie dada (Monserud, 1984).

La caracterización del IS se ha realizado tradicionalmente mediante la medición y remediciones en campo de la altura y la edad de los cien árboles más gruesos por hectárea, a partir de las cuales se pueden generar curvas de altura-edad (Socha et al., 2017). De forma alternativa a la medición en campo, también se ha utilizado la interpretación visual de imágenes aéreas complementada con observaciones de inventarios de campo en fechas repetidas (Eid, 2000). No obstante, ambas técnicas son costosas en términos económicos y de tiempo (Tompalski et al., 2022).

La tecnología LiDAR aerotransportada ha demostrado ser óptima en la estimación de la altura dominante, siendo ésta la variable dasométrica para la que se obtiene una mayor precisión (Næsset, 2004). Sobre esta base, diversos estudios han utilizado la altura dominante derivada de un vuelo LiDAR, en combinación con la edad del rodal, para calcular el IS (Chen & Zhu, 2012; Tompalski et al., 2015). El incremento de la disponibilidad de datos LiDAR multitemporales ha permitido el desarrollo de estudios que han probado la eficacia para ajustar las trayectorias o curvas de crecimiento en altura dominante-edad en masas monoespecíficas en Centroeuropa (Socha et al., 2017) o en pinares de *Pinus pinaster* en Galicia (Guerra-Hernández et al., 2021); así mismo, también se ha analizado cómo diferentes tamaños de celda influyen en el modelo de IS derivado (Socha et al., 2020). El IS medido en campo para la edad de referencia, que en el presente estudio se ha definido en 60 años (Rojo-Alboreca et al., 2017), se puede estimar utilizando datos LiDAR multitemporales mediante dos enfoques principales: indirecto y directo.

En el enfoque indirecto se modela la altura dominante de la masa para un punto en el tiempo y se transfiere el modelo a otro punto en el tiempo. Derivadas las alturas dominantes con métricas LiDAR para dos puntos en el tiempo y conociendo la diferencia de años entre ambas predicciones, se utilizan curvas empíricas para estimar el IS. Pese a que el enfoque indirecto no precisa del conocimiento de la edad de la masa, requiere de predicciones en dos momentos distintos en el tiempo y, a priori, puede mostrar una menor precisión (Bollandsås et al., 2013). Por su parte, el enfoque directo se basa en un análisis de regresión que relaciona el valor de IS derivado con curvas de altura-edad para la edad de referencia con respecto a métricas LiDAR de dos coberturas. En este contexto, existe un número reducido de estudios que hayan estimado el IS utilizando un enfoque directo, como por ejemplo Noordermeer et al. (2018, 2020), quienes aplicaron este enfoque en Noruega utilizando datos LiDAR de dos vuelos multitemporales.

Uno de los principales problemas asociados a la utilización de información LiDAR multitemporal es la posible asincronía entre los datos de campo y los datos de las nubes de puntos, si bien la integración de modelos de crecimiento de árbol individual o de masa permiten flexibilizar su uso (Zhao et al., 2018), así como generar modelos basados en el enfoque directo (Fekety et al., 2015; Domingo et al., 2019; Navarro et al., 2020).

El objetivo principal de este trabajo es estimar el IS aplicando un enfoque directo a masas repobladas o naturalizadas de *Pinus halepensis* Miller (en adelante pino carrasco) utilizando datos multitemporales LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Las masas forestales objeto de estudio se localizan en Aragón en torno a la Depresión del Ebro y las estribaciones del sistema ibérico (Figura 1). Se trata de masas monoespecíficas de pino carrasco, tanto repobladas como naturales, que están adaptadas a unas condiciones mediterráneas semiáridas, con unas precipitaciones anuales que varían de entre los 350 mm y los 1000 mm y temperaturas anuales medias de en torno a 14˚C, con inviernos fríos y veranos secos y cálidos. Los bosques se desarrollan principalmente sobre litologías carbonatadas y margosas y presentan un sotobosque constituido por especies como *Quercus coccifera* L., *Juniperus oxycedrus* L., *Thymus vulgaris* L. y *Rosmarinus officinalis* L, entre otros.

2.2. Datos de campo y cálculo del IS

Los datos de campo se adquirieron en 151 parcelas durante tres campañas de campo realizadas de junio a julio de 2013, de julio a septiembre de 2014 y en abril de 2017, denominadas a partir de ahora como primera, segunda y tercera campaña, respectivamente.

En la primera y segunda campañas de campo se muestrearon, respectivamente, 58 y 42 parcelas circulares de 15 m de radio (Figura 1). Mediante un sistema de posicionamiento Leica VIVA®GS15 CS10 GNSS se registraron las coordenadas del centro de cada parcela. Se midieron los diámetros a la altura del pecho para aquellos árboles con un diámetro superior a 7,5 cm utilizando una cinta diamétrica en la primera campaña y, en la segunda, una forcípula Haglöf Sweden®Mantax Precision Blue. Las alturas de los árboles y de la base de las copas se midieron con un hipsómetro Suunto® en la primera campaña y con un vertex Haglöf Sweden® en la segunda. La medición de la edad de las masas se realizó basándose en la edad de las repoblaciones para el caso de la primera campaña y mediante barrena Pressler y posterior medición de los anillos, seleccionando los árboles dominantes, para la segunda, estas últimas realizadas en una campaña adicional en el año 2019.

En la tercera campaña de campo se recogió información de 51 parcelas circulares con radio variable en función de la densidad de la masa (Domingo et al. 2019) de 5,6 m (3 parcelas), 8,5 m (23 parcelas), 11,3 m (17 parcelas) y 14,1 m (7 parcelas) (Figura 1). Las coordenadas del centro de las parcelas se tomaron utilizando sistema de posicionamiento Trimble®GNSS. El diámetro a la altura del pecho se midió utilizando la forcípula de la segunda campaña. La altura de la base de la copa y la altura de hasta seis pies más próximos al centro de la parcela se midieron utilizando un vertex Haglöf Sweden®. Además, se complementó el muestreo para lograr capturar los 100 pies dominantes por hectárea, considerando aquellos con mayor diámetro a la altura del pecho y sin daños significativos en la copa. De aquellos árboles seleccionados para medir la altura, se extrajeron *cores* utilizando una barrena Pressler y, posteriormente, se midieron los anillos para obtener la edad de la masa. La altura de los árboles no medidos en campo se estimó utilizando ecuaciones altura-diámetro desarrolladas a partir de los pies muestreados en campo (Alonso, Herández-Jiménez 2020). Para la realización de dichos modelos, se verificó la normalidad de los residuos, la homocedasticidad, la independencia y la no auto-correlación de los residuos, lo que permitió ajustar modelos de regresión linear.

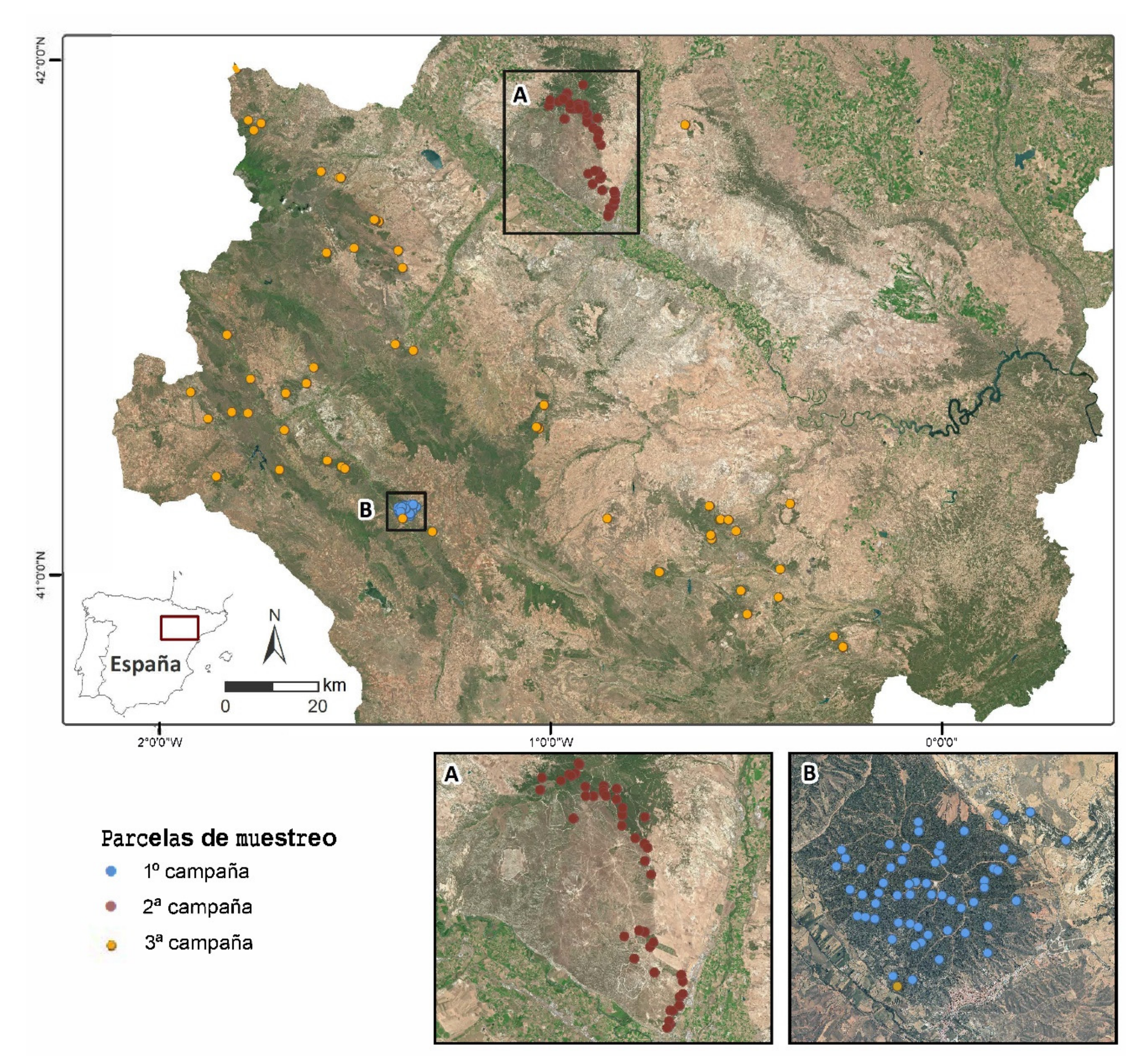


Figura 1. Área de estudio con la localización de las parcelas de campo agrupadas por campañas.

Los datos de campo se armonizaron para el año 2011, en concordancia con el primer vuelo LiDAR, utilizando el modelo de árbol individual PHRAGON-2017 (Alonso, 2018), implementado a través de la plataforma de simulación Simanfor (Bravo et al., 2012), siguiendo el proceso metodológico expuesto en Domingo et al. (2019). El cálculo del IS para cada parcela de muestreo se realizó utilizando las ecuaciones de altura dominante-edad para pino carrasco en el Valle del Ebro (Rojo-Alboreca et al., 2017), ajustadas mediante la metodología GADA (Castedo-Dorado et al., 2007), estableciendo la edad de referencia en los 60 años (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de las variables dendrométricas y dasométricas de las masas objeto de estudio. N: densidad (pies/ha); G: área basimétrica (m²/ha); DG: diámetro cuadrático medio (cm); HO: altura dominante (m); Edad: edad de la masa (años); IS: índice de sitio (m).

Variable	*Media*	*Máximo*	*Mínimo*	*Desviación estándar*
N	697,59	3200,00	70,74	485,39
G	21,29	58,89	0,42	10,22
DG	21,80	43,52	8,73	8,15
HO	11,35	18,90	3,66	3,63
Edad	69,25	96,00	24,00	21,50
IS	10,77	20,34	4,80	2,69

2.3. Datos LiDAR

Los datos LiDAR se capturaron en los años 2011 y 2016 en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Las nubes de puntos, con una densidad nominal de 0,5 puntos m^{-2} para la primera cobertura y 1 punto m^{-2} para segunda, se distribuyen en archivos de 2x2 km de extensión en formato binario LAS, capturados con hasta cuatro retornos por pulso (Tabla 2).

Las nubes de puntos fueron procesadas eliminando el ruido y filtrando los retornos mediante el algoritmo de clasificación de curvatura multiescala desarrollado por Evans y Hudak (2007), de acuerdo con Montealegre et al. (2015a). Los puntos correspondientes al suelo desnudo se interpolaron con el método "Point-TIN-Raster" (Renslow, 2013), empleando una resolución espacial de 1 m para generar un modelo digital de elevaciones (MDE) para cada cobertura (Montealegre et al*.,* 2015b). Los valores del MDE de cada cobertura se utilizaron para normalizar las alturas de las respectivas nubes de puntos.

Posteriormente, la nube de puntos de ambas coberturas se recortó utilizando la geometría de las parcelas de campo mediante el *software* FUSION (McGaughey, 2009) y se obtuvo el conjunto de estadísticas que comúnmente se utilizan como independientes en el modelado de variables forestales (Evans et al., 2009) para describir la altura (e.g.: percentil 95), la densidad del dosel (e.g: cobertura) y la variabilidad de las alturas (e.g.: coeficiente de variación, coeficiente de variación de los L momentos). Se calcularon además tres índices de diversidad estructural: *Foliage Height Diversity Index*, que constituye una adaptación del índice de Shannon (H´); *LiDAR height evenness index* (LHEI), propuesto por Listopad et al. (2015) como una adaptación del índice de Pielou (J´); índice Rumple (Kane et al., 2010), que permite caracterizar la rugosidad del dosel forestal. Cabe destacar que, para el cálculo de todas las variables LiDAR, se aplicó un umbral de 2 m sobre el suelo para despreciar los retornos pertenecientes al sotobosque. Por último, se calcularon las variables asociadas a la diferencia entre ambas coberturas.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de las coberturas LiDAR utilizadas.

Características	*Año 2011*	*Año 2016*
Periodo de tiempo	enero y febrero	septiembre a noviembre
Sistema de escaneo Laser	Leica ALS60	Leica ALS80
Longitud de onda	1.064 nm	1.064 nm
Altitud de vuelo media sobre el nivel del mar	3.000 m	3.150 m
Frecuencia de repetición de pulsos	~70 kHz	176–286 kHz
Frecuencia de escaneo	~45 kHz	28–59 Hz
Ángulo de escaneo máximo	29˚	25˚
Densidad de puntos nominal	0,5 puntos m^{-2}	1 punto m^{-2}
Densidad de puntos media	0,64 puntos m^{-2}	1,25 puntos m^{-2}
Precisión de la nube de puntos (RMSEz)	≤0,2 m	0,09 m

2.4. Estimación del IS

Con objeto de obtener un modelo parsimonioso, se realizó una selección de variables independientes LiDAR mediante dos métodos de selección: correlación de Spearman y selección por todos los subconjuntos. Los coeficientes de correlación de Spearman (ρ) se calcularon utilizando el software R para determinar la fuerza y el signo de la relación existente entre el IS medido en campo y las variables LiDAR. La selección de

las variables LiDAR se realizó considerando un ρ valor mínimo positivo o negativo de 0,5 (Darío Domingo et al., 2018). La selección por todos los subconjuntos permite escoger un grupo de variables en las que los modelos pueden centrar su atención, ignorando el resto de variables. Este método puede implementarse utilizando diversos enfoques de búsqueda, entre los que se han probado cuatro: exhaustivo, hacia delante, hacia detrás y reemplazo secuencial, todos ellos implementados en el paquete "leaps" de R (Miller, 2002).

Tras la selección de las variables que presentaban mejores ajustes se utilizó el método de regresión no paramétrico Support Vector Machine (SVM) para estimar el IS medido en campo. El método de inteligencia artificial SVM utiliza algoritmos de aprendizaje capaces de analizar y reconocer patrones. Este modelo de aprendizaje supervisado considera que los datos son separables en clases en el espacio y trata de buscar, entre hiperplanos multidemensionales, la separación óptima entre las mismas (Mountrakis et al., 2011). Los datos localizados en los hiperplanos se denominan *support vectors* y son los más difíciles de clasificar, dado que la separabilidad es menor. Se generaron modelos de regresión SVM con *kernel* linear y con *kernel* radial utilizando el paquete "e1071" de R. Los modelos se calibraron mediante el uso de los parámetros *cost* (según el intervalo 1-1.000) y *gamma* (según el intervalo 0,01-1).

La muestra original de 151 parcelas se dividió en dos: 75% para el entrenamiento del modelo y el 25% para la validación. Los modelos se ejecutaron 100 veces para incrementar la robustez en los resultados, dada la aleatoriedad asociada al modelo SVM (García-Gutiérrez et al., 2015). El ajuste y la bondad de los modelos se compararon mediante el error cuadrático medio (RMSE), el porcentaje del RMSE con respecto a la media (% RMSE) y el promedio de los residuos (sesgo). Los valores de ajuste y bondad de los modelos son resultantes de la media de las 100 iteraciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de estimación del IS muestran que el mejor modelo es el generado con variables seleccionadas utilizando Spearman y el algoritmo SVM con kernel radial, con un %RMSE sobre la media de 16,47 (Tabla 3 y Figura 2). Concretamente, se han incluido tres variables LiDAR: el percentil 90 de la primera y de la segunda cobertura y el índice Rumple de la segunda cobertura. Los modelos de selección fueron Spearman seguido de remplazo secuencial, concordando con trabajos previos de estimación de variables dasométricas con LiDAR en masas de pinar mediterráneo (Domingo et al., 2018, 2019).

La precisión de los modelos es similar a la obtenida en trabajos anteriores para *Pinus sylvestris* en Noruega con un RMSE% de valores entre 11,78 y 13,79 (Noordermeer et al., 2018, 2020) o, más recientemente, para plantaciones de álamo en Canadá, con un RMSE% de 16,6 (Tompalski et al., 2022). En nuestro caso, de acuerdo con Noordermeer et al. (2018), quienes también incluyen variables asociadas a percentiles altos como principales predictores, la utilización de variables basadas en las diferencias entre coberturas no produjo un mejor ajuste de los modelos. Complementariamente, la inclusión en los modelos de variables asociadas a la variabilidad estructural, como el caso del índice Rumple, se ha mostrado útil para incrementar la precisión de los modelos con una mejora del 1,19 %RMSE.

Tabla 3. Modelos de estimación del IS según los métodos de selección y resultados de la validación de los mismos. SVMr. refiere a SVM con kernel radial y SVMl. refiere a SVM con kernel linear. C1 refiere a primera cobertura; C2 refiere a segunda cobertura.

Selección	*Métricas LiDAR*	*Modelo*	*Entrenamiento*			*Validación*		
			RMSE	*% RMSE*	*Bias*	*RMSE*	*%RMSE*	*Bias*
Spearman	P.90 C1 + P90 C2 + Rumple C2	SVMr.	1,77	16,44	0,39	1,77	16,47	0,34
		SVMl.	1,77	16,41	0,34	1,79	16,65	0,29
Reemplazo secuencial	P.60 C1+ Elevación media C2+ Asimetría de los L momentos C2	SVMr.	1,74	16,12	0,35	1,82	16,94	0,31
		SVMl.	1,76	16,38	0,35	1,80	16,68	0,29
Exhaustivo	P.95 C1+ P.90 C2+ Desviación absoluta sobre la media C2	SVMr.	1,80	16,69	0,40	1,87	17,40	0,39
		SVMl.	1,82	16,94	0,40	1,86	17,32	0,38
Hacia adelante	P.70 C1+ P.70 C2 + Asimetría C2	SVMr.	1,74	16,14	0,37	1,88	17,51	0,36
		SVMl.	1,78	16,52	0,37	1,86	17,28	0,35
Hacia atrás	P.60 C1+ Elevación media C2+ Desviación absoluta sobre la media C2	SVMr.	1,80	16,73	0,40	1,83	17,03	0,35
		SVMl.	1,81	16,84	0,39	1,82	16,90	0,33

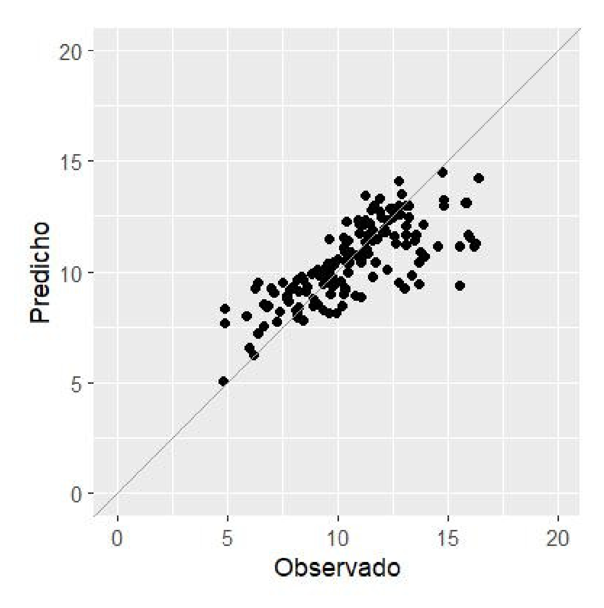


Figura 2. Gráfico de dispersión de los valores predichos *vs* observados utilizando el modelo SVMr. con las métricas del percentil 90 de la primera y de la segunda cobertura y el índice Rumple.

Los resultados obtenidos muestran la viabilidad de estimar el IS utilizando un método directo con información LiDAR de baja densidad de puntos en pinares mediterráneos. Aunque el método directo precisa del conocimiento de la edad de la masa posibilita realizar una única predicción con un único conjunto de errores (Bollandsås et al., 2013). En este sentido, futuros trabajos deben enfocarse en la comparación del método directo y del indirecto, con objeto de verificar cual ofrece mejores resultados en la gestión en pinares mediterráneos. Adicionalmente, la comparación entre métodos paramétricos y no paramétricos, siendo estos últimos especialmente útiles cuando la muestra es mayor (Domingo et al., 2019), permitirá discernir cuál es la solución óptima para la estimación y cartografía posterior del IS. El trabajo abre posibilidades de utilización de estos modelos para el conocimiento *a priori* de la productividad de diversas zonas y para la gestión sostenible de las masas forestales de pinares mediterráneos.

4. CONCLUSIONES

La estimación del IS con datos LiDAR-PNOA de baja densidad de puntos en masas forestales de pino carrasco proporciona información relevante para la gestión de las masas forestales. Los modelos basados en variables seleccionadas en función de la correlación de Spearman y el algoritmo SVM con kernel radial muestran la viabilidad de aplicar el enfoque directo, utilizando dos coberturas LiDAR y el conocimiento de la edad de la masa, para estimar el IS con un error cuadrático de 16,47% respecto a la media. La estimación del IS utilizando sensores de teledetección activa LiDAR en espacios forestales heterogéneos del ámbito mediterráneo proporciona información útil para conocer su productividad y el aprovechamiento de los recursos locales, promoviendo la gestión sostenible y contribuyendo, por ende, al alcance de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con la financiación de la Unión Europea-NextGenerationEU, a través de una ayuda Margarita Salas concedida a Darío Domingo (MS-240621), y del Gobierno de Aragón (Grupo S51_20R, cofinanciado FEDER "Construyendo Europa desde Aragón"). Los datos de campo correspondientes a la segunda campaña de campo fueron financiados por Proyecto del Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza (2013-04) y la tercera campaña de campo fue financiada con Fondos FEADER al amparo del PDR de Aragón 2014-2020, a través de la Medida 8, Submedida 8.5, Operación 8.5.d - Consecución de una gestión forestal sostenible. “Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural: Europa invierte en las zonas rurales”.

5. BIBLIOGRAFÍA

Alonso Ponce, R. (2018). *SIMANFOR - Sistema de Simulación de Manejo Forestal Sostenible | Gestión Forestal*

Sostenible. Retrieved September 28, 2018, from http://sostenible.palencia.uva.es/content/simanfor-sistema-de-simulacion-de-manejo-forestal-sostenible

Alonso Ponce R, Hernández-Jiménez Á (2020). Itinerarios selvícolas para las masas repobladas de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) en Aragón. Gobierno de Aragón, Jornada, Fondos FEADER-PDR de Aragón 2014. https://app.box.com/s/ib1683k0mlfdg0f0qhy6ego2ifn5kyzx

Bollandsås, O. M., Gregoire, T. G., Næsset, E., Øyen, B. H. (2013). Detection of biomass change in a Norwegian mountain forest area using small footprint airborne laser scanner data. *Statistical Methods and Applications*, 22(1), 113–129. https://doi.org/10.1007/s10260-012-0220-5

Bravo, F., Rodriguez, F., Ordóñez, C. (2012). A web-based application to simulate alternatives for sustainable forest management: SIMANFOR. *Forest Systems*, 21(1), 4. https://doi.org/10.5424/fs/2112211-01953

Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Barrio-Anta, M., Álvarez-Gonzàlez, J. G. (2007). Modelling stand basal area growth for radiata pine plantations in Northwestern Spain using the GADA. *Annals of Forest Science*, 64(6), 609–619. https://doi.org/10.1051/FOREST:2007039

Chen, Y., Zhu, X. (2012). Site quality assessment of a Pinus radiata plantation in Victoria, Australia, using LiDAR technology. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 74(4), 217–227. https://doi.org/10.2989/20702620.2012.741767

Domingo, D., Alonso, R., Lamelas, M. T., Montealegre, A. L., Rodríguez, F., de la Riva, J. (2019). Temporal transferability of pine forest attributes modeling using low-density airborne laser scanning data. *Remote Sensing*, 11(3). https://doi.org/10.3390/rs11030261

Domingo, D., Lamelas, M., Montealegre, A., García-Martín, A., de la Riva, J. (2018). Estimation of Total Biomass in Aleppo Pine Forest Stands Applying Parametric and Nonparametric Methods to Low-Density Airborne Laser Scanning Data. *Forests*, 9(4), 158. https://doi.org/10.3390/f9040158

Eid, T. (2000). Use of uncertain inventory data in forestry scenario models and consequential incorrect harvest decisions. *Silva Fennica*, 34(2), 89–100. https://doi.org/10.14214/SF.633

Evans, J. S., Hudak, A. T. (2007). A Multiscale Curvature Algorithm for Classifying Discrete Return LiDAR in Forested Environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(4), 1029–1038. https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.890412

Evans, J. S., Hudak, A. T., Faux, R., Smith, A. M. S. (2009). Discrete Return Lidar in Natural Resources: Recommendations for Project Planning, Data Processing, and Deliverables. *Remote Sensing*, 1(4), 776–794. https://doi.org/10.3390/rs1040776

Fekety, P. A., Falkowski, M. J., Hudak, A. T. (2015). Temporal transferability of LiDAR-based imputation of forest inventory attributes. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(4), 422–435. https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0405

García-Gutiérrez, J., Martínez-Álvarez, F., Troncoso, A., Riquelme, J. C. (2015). A comparison of machine learning regression techniques for LiDAR-derived estimation of forest variables. *Neurocomputing*, 167, 24–31. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.09.091

Guerra-Hernández, J., Arellano-Pérez, S., González-Ferreiro, E., Pascual, A., Sandoval Altelarrea, V., Ruiz-González, A. D., Álvarez-González, J. G. (2021). Developing a site index model for P. Pinaster stands in NW Spain by combining bi-temporal ALS data and environmental data. *Forest Ecology and Management*, 481, 118690. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118690

Kane, V. R., Bakker, J. D., McGaughey, R. J., Lutz, J. A., Gersonde, R. F., Franklin, J. F. (2010). Examining conifer canopy structural complexity across forest ages and elevations with LiDAR data. *Canadian Journal of Forest Research*, 40(4), 774–787. https://doi.org/10.1139/X10-064

Listopad, C. M. C. S., Masters, R. E., Drake, J., Weishampel, J., Branquinho, C. (2015). Structural diversity indices based on airborne LiDAR as ecological indicators for managing highly dynamic landscapes. *Ecological Indicators*, 57, 268–279. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.04.017

McGaughey, R. (2009). *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.

Miller, A. J. (2002). *Subset selection in regression*. Chapman & Hall/CRC.

Monserud, R. A. (1984). Height Growth and Site Index Curves for Inland Douglas-fir Based on Stem Analysis Data and Forest Habitat Type. *Forest Sci*, 30(4), 943–965.

Montealegre, A. L., Lamelas, M. T., de la Riva, J. (2015a). A Comparison of Open-Source LiDAR Filtering Algorithms in a Mediterranean Forest Environment. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(8), 4072–4085. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2436974

Montealegre, A., Lamelas, M., de la Riva, J. (2015b). Interpolation Routines Assessment in ALS-Derived Digital Elevation Models for Forestry Applications. *Remote Sensing*, 7(7), 8631–8654. https://doi.org/10.3390/rs70708631

Mountrakis, G., Im, J., Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), 247–259. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001

Næsset, E. (2004). Accuracy of forest inventory using airborne laser scanning: evaluating the first nordic full-scale operational project. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6), 554–557. https://doi.org/10.1080/02827580410019544

Navarro, J. A., Tomé, J. L., Marino, E., Guillén-Climent, M. L., Fernández-Landa, A. (2020). Assessing the transferability of airborne laser scanning and digital aerial photogrammetry derived growing stock volume models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91, 102135. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102135

Noordermeer, L., Bollandsås, O. M., Gobakken, T., Næsset, E. (2018). Direct and indirect site index determination for Norway spruce and Scots pine using bitemporal airborne laser scanner data. *Forest Ecology and Management*, 428, 104–114. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.06.041

Noordermeer, L., Gobakken, T., Næsset, E., Bollandsås, O. M. (2020). Predicting and mapping site index in operational forest inventories using bitemporal airborne laser scanner data. *Forest Ecology and Management*, 457, 117768. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117768

Renslow, M. (2013). *Manual of Airborne Topographic Lidar*. The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

Rojo-Alboreca, A., Cabanillas-Saldaña, A. M., Barrio-Anta, M., Notivol-Paíno, E., Gorgoso-Varela, J. J. (2017). Site index curves for natural Aleppo pine forests in the central Ebro valley (Spain). *Madera y Bosques*, 23(1), 143. https://doi.org/10.21829/myb.2017.231495

Skovsgaard, J. P., Vanclay, J. K. (2008). Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 81(1), 13–31. https://doi.org/10.1093/FORESTRY/CPM041

Socha, J., Hawryło, P., Stereńczak, K., Miścicki, S., Tymińska-Czabańska, L., Młocek, W., Gruba, P. (2020). Assessing the sensitivity of site index models developed using bi-temporal airborne laser scanning data to different top height estimates and grid cell sizes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91, 102129. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102129

Socha, J., Pierzchalski, M., Bałazy, R., Ciesielski, M. (2017). Modelling top height growth and site index using repeated laser scanning data. *Forest Ecology and Management*, 406, 307–317. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.039

Tompalski, P., Coops, N. C., Achim, A., Cosgrove, C. F., Lapointe, E., Brochu-Marier, F. (2022). Modeling site index of selected poplar clones using Airborne Laser Scanning data. *Canadian Journal of Forest Research*, 1 June 2022. https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0257

Tompalski, P., Coops, N. C., White, J. C., Wulder, M. A., Pickell, P. D. (2015). Estimating Forest Site Productivity Using Airborne Laser Scanning Data and Landsat Time Series. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 41(3), 232–245. https://doi.org/10.1080/07038992.2015.1068686

Zhao, K., Suarez, J. C., Garcia, M., Hu, T., Wang, C., Londo, A. (2018). Utility of multitemporal lidar for forest and carbon monitoring: Tree growth, biomass dynamics, and carbon flux. *Remote Sensing of Environment*, 204, 883–897. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2017.09.007



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 144-151

Estudio y análisis de las poblaciones de *Quercus suber* de la Sierra de la Virgen. Modelos de predicción con machine learning: árbol de decisiones

V. García Magalhaes[1], L.A. Longares Aladrén[1]

[1] Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio Pabellón de Geografía -Campus San Francisco- Universidad de Zaragoza

vero.g.magalhaes@gmail.com, lalongar@unizar.es

RESUMEN: Los ejemplares de *Quercus suber* (alcornoque) presentes en la provincia de Zaragoza, se desarrollan en su límite ecológico, lejos de los principales núcleos de distribución. Esta característica les otorga una importancia genética reseñable, que pone de manifiesto su necesidad de conservación y desarrollo. Con este como objetivo principal, es necesaria una intervención sobre el terreno que favorezca una regeneración natural, atendiendo tanto a variables físicas como climáticas. En este trabajo se aplican modelos de predicción que emplean el aprendizaje automático (*Machine Learning*) para el estudio del comportamiento y desarrollo de esta población vegetal, que sirvan de apoyo a la toma de decisiones en caso de intervención, a través del mapa resultante, que representa las posibles localizaciones, de las tres coberturas analizadas.

Palabras-clave: *Quercus suber*, Sestrica, Aniñón, aprendizaje automático, árbol de decisiones.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción general

El presente trabajo analiza el espacio donde se localizan las poblaciones de *Quercus suber* de la provincia de Zaragoza, en las estribaciones de la Sierra de la Virgen, en concreto en los municipios de Sestrica y Aniñón, con la finalidad de analizar la potencialidad del territorio de cara a una posible intervención sobre el terreno para aumentar la presencia de esta especie en la zona.

Primero se lleva a cabo un análisis de los factores que influyen en la especie en el territorio, para después establecer un modelo de predicción mediante *Machine Learning* que facilite la toma de decisiones de cara a una posible repoblación.

1.2. Antecedentes y justificación

Uno de los problemas medioambientales más importantes a nivel mundial, es la pérdida de biodiversidad, siendo ésta definida como la "la variabilidad entre los organismos vivientes de todas las fuentes, incluyendo, entre otros, los organismos terrestres, marinos y de otros ecosistemas acuáticos, así como los complejos ecológicos de los que forman parte: esto incluyen diversidad dentro de las especies, entre especies y de ecosistemas ("Convention on biological diversity 1988, p.1). Ante esta problemática se hace necesaria la puesta en marcha de planes de conservación, principal herramienta para la lucha por la pérdida de la biodiversidad.

Los bosques son una fuente de biodiversidad muy importante, al servir de refugio y alimento a gran número de especies, siendo uno de los ecosistemas que mayor variabilidad de estas albergan, de ahí la importancia de su conservación.

La presencia de masas de *Quercus suber* en esta zona del Sistema Ibérico aragonés, en un contexto

mediterráneo próximo al semiárido, es una peculiaridad desde el punto de vista biogeográfico que, otorga a esta comarca del Aranda un valor especial por su singularidad (Hernández et. al, 2007), que ha llevado a plantearse a los gestores del territorio la toma de medidas para su conservación y mejora como hábitat prioritario de la Directiva Hábitat 2000.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

La formación de alcornocal analizada en este estudio se encuentra en los términos municipales de Aniñón y Sestrica, en la provincia de Zaragoza, dentro de la conocida como Sierra de la Virgen. Esta Sierra representa uno de los bloques elevados del sistema ibérico de edad paleozoica, caracterizada por su alineación ibérica armónica.

2.2. Metodología

Todo el trabajo desarrollado, se ha realizado en el contexto de una malla de 200 metros de lado creada para este trabajo y, que ha servido como base para la extracción de los datos de los parámetros analizados, necesarios para la creación del modelo de hábitat para la especie y que son:

- Parámetros fisiográficos: altitud media, pendiente, litología y edafología
- Parámetros climáticos, media obtenida en un rango de años desde 1960 hasta 2018, de: temperatura máxima de cada uno de los meses, temperatura mínima de cada uno de los meses y precipitación de media

Uno de los principales factores a analizar y necesarios para la definición del modelo de hábitat de las masas de alcornocal, ha sido el relacionado con la morfología del terreno y sus características de suelo. Este parámetro, se ha obtenido a través de la combinación de cartografía geomorfológica y de información sobre la litología de la zona, esta última apoyada en el estudio de Badía-Villas et al., 2021. La combinación de ambos parámetros ha permitido definir unidades morfolitológicas sobre las que extrapolar información de tipos de suelos.

Para este trabajo, se ha contado con ortofografías PNOA de máxima resolución, de la hoja del mapa topográfico nacional 0381 del año 2018 y MDT , descargados desde la web de CNIG (www.centrodecescargas.cnig.es) información que ha sido incorporada en un Sistemas de información Geográfica, en concreto Arcgis 10.7.1 bajo licencia de la Universidad de Zaragoza, para proceder mediante análisis visual, con criterios geomorfológicos, a la elaboración de la cartografía de unidades morfolitológicas (Figura 1).

2.3. Elaboración de los modelos

Teniendo como objetivo general el análisis de las poblaciones de *Quercus suber* y como objetivo específico, la realización de una cartografía predictiva, se decide elaborar los modelos predictivos mediante la herramienta *Machine Learning*, aprendizaje automático.

Se ha decidido aplicar esta metodología para el presente trabajo, ya que el aprendizaje para la elaboración del modelo no requiere suposiciones previas, ni conocer las relaciones subyacentes entre las variables, el algoritmo procesará los datos y establecerá los patrones, aprenderá de ellos, por lo que cuantos más se tengan, más afinado será el patrón de relaciones.

Se han utilizado las librerías descritas en la bibliografía, como panda, numpy, o scikit. Esta elección se lleva a cabo por ser las más adecuadas para los análisis realizados. Una vez seleccionadas las librerías y cargadas en el programa Júpiter (https://jupyter.org/try) utilizado durante el desarrollo y análisis de los datos, se cargan las tablas obtenidas en la malla de 200 metros.

En este trabajo se ha optado por el aprendizaje supervisado porque el conjunto de datos tiene salidas/etiquetas conocidas mediante un modelo de clasificación, ya que están etiquetados, dividiéndose estas en varias categorías de predicción: existencia de alcornocales al 30% de cobertura; existencia de alcornocales al 70%; sin existencia de alcornocales

El conjunto de algoritmos utilizado no podrá predecir salidas distintas a las descritas porque no se ha entrenado el modelo con dicho objetivo. Para poder clasificar un nuevo conjunto de datos con otras etiquetas a las anteriormente mencionadas, se tendrían que aportar más datos de entrada y volver a entrenar el modelo.

El algoritmo utilizado es el modelo de árbol de decisiones por ser estos fáciles de entender, permitir la exploración de datos e identificar importancia de variables a partir de cientos de ellas, así como la limpieza de datos. Los árboles de decisiones son representaciones gráficas de posibles soluciones a una decisión basada en ciertas condiciones. Es uno de los algoritmos más utilizados en aprendizaje automático. Su comprensión es simple a la vez que potente .(Raschka & Mirjalili, 2019, p. 90)

Tienen un primer nodo que se denomina root (nodo raíz) que se va descomponiendo en el resto de atributos de entrada en dos ramos, planteando una cuestión que puede ser falsa/cierta y vuelve a dividirse hasta llegar a la profundidad máxima posible y dar lugar a las llamadas hojas o nodos finales, que son las respuestas a la solución planteada en el root.

Para llevar a cabo el análisis de todos los árboles y nodos posibles, el algoritmo debe medir todas las predicciones logradas y valorarlas, para poder compararlas entre sí y obtener la mejor. Para esto se utilizan diferentes funciones, destacando el "índice de Gini" y "Ganancia de información, conocida como entropía.

El índice de Gini se usa para atributos categóricos. Intenta estimar la información que da cada uno de los atributos. Para medir la aleatoriedad de incertidumbre de un valor aleatorio se define la Entropía. Calculando la entropía de cada uno de los atributos se puede calcular la ganancia de información del árbol, que se debe maximizar.

La entropía mide el grado de incertidumbre de una muestra, la impureza o aleatoriedad que hay en un conjunto de datos. Una muestra completamente homogénea, en la que todos los datos están clasificados de la misma manera, la incertidumbre es mínima. En ese caso entropía o incertidumbre será cero. Sin embargo, una muestra que se ha distribuido de igual manera, que cada clasificación que hay tiene el mismo número de ejemplos, tendrá una incertidumbre máxima, es decir 1. (Raschka & Mirjalili, 2019, p. 82). Cuando menor sea la entropía, mejor será el modelo a entrenar.

El primer análisis llevado a cabo es un análisis exploratorio de los datos. A continuación, se definen las entradas (features o inputs) y las salidas (targets) siendo estas últimas las coberturas de *Quercus* tanto al 70% como al 30% como la inexistencia de la especie analizada. Los inputs hacen referencia a todos los parámetros analizados, tanto los climáticos como los físicos, así como los geomorfolitológicos, siendo descartados algunos de ellos en el análisis exploratorio de los datos.

Una vez cargadas las librerías necesarias para llevar a cabo el análisis estadístico se elabora una tabla de presentación de datos donde aparecen reflejados los mismos.

Por defecto, el percentil inferior es 25 y el percentil superior es 75. Las precipitaciones de cada mes vendrán reflejadas por P más el mes, la temperatura máxima por TM y la mínima por tm.

Una vez importada la tabla al programa se realiza una limpieza de datos, donde una de las cosas que se busca es si alguna de las variables analizadas o de los parámetros estudiados, tiene una desviación estándar de cero, ya que estaríamos ante una constante por lo que no aportaría nada al modelo. En el área estudiada se observa que ninguno de los parámetros analizados cumple con este requisito por lo que todos los parámetros metidos en la tabla serán analizados.

Se estudia la correlación entre los parámetros de entrada dando como resultado una matriz de correlación, donde se puede observar que los parámetros de altitud y pendiente están poco correlacionados con el resto de las de los parámetros. Sin embargo, el resto de los parámetros tienen una alta correlación.

2.4. Modelos

Para la realización del modelo se hace necesario pasar las etiquetas de la existencia de cobertura de *Quercus* a representación numérica quedando de la siguiente manera: *Quercus suber* en cubiertas de más del 30%: 0; *Quercus suber* en cubiertas de más del 70%: 1; Otras cubiertas vegetales: 2. Estos valores de 0, 1 y 2, son dados de forma automática por el programa.

Una vez aplicada la función de evaluación se ajusta al modelo para que sea lo más preciso posible y se define el árbol de decisiones a través de las librerías sklearn.

Se lleva a cabo el modelo de árbol de regresión con profundidad 5, para cuya visualización se utiliza la función de export_grafphic, aunque el resultado no se visualiza aquí.

El siguiente paso realizado es el análisis del árbol para ver si es posible su mejora. En la gráfica se puede ver un nodo raíz que hace una primera división por las temperaturas máximas en noviembre, dirigiéndose las salidas a la izquierda por True, las que son menores a 30,5 es decir la clase 70% que son las que más *Quercus* tienen y a la derecha hacia False para las clases del 30% y de otras coberturas. En los diferentes

niveles se ven divisiones por diferentes tipos tanto de precipitación, pendiente, temperaturas mínimas etc. Se puede observar que algunas de las hojas finalizan antes de llegar al último nivel. Esto se debe a que alcanzan un nivel de entropía cero o bien a que tienen un número de muestras menor al mínimo permitido para hacer la separación (16). La precisión alcanzada por el árbol da unos valores de 81,06%. Un porcentaje de precisión bastante elevado considerando el número de muestras analizadas.

A lo largo del estudio se han ido cambiando los parámetros de configuración del árbol para conseguir un porcentaje de precisión mayor. Estos parámetros no son los parámetros analizados sino los propios de la función tales como la profundidad (max_depth), el número mínimo de muestras de hojas (min_samples_leaf) y el número mínimo de muestras por separación (min_samples_split).

No se consigue mejorar el porcentaje de precisión por lo que se da por bueno el árbol anterior. Para comprobar este modelo de predicción se lleva a cabo el uso de los datos reservados para test. Estos datos son los datos de los parámetros analizados cuyas salidas de presencia de *Quercus suber* se conocen.

3. RESULTADOS

El mapa obtenido es un mapa de probabilidad de ocupación por parte de *Quercus suber* en función de la cobertura de suelo de la especie. Una buena parte del mapa está cubierto por píxeles que corresponden a zonas idóneas en cuanto a la viabilidad a la hora de realizar trabajos de mejora de la cubierta forestal, con la finalidad de obtener una cobertura del 70% de *Quercus suber*. Son los píxeles de color verde (figura 2), que se distribuyen a lo largo de la zona noreste, este, sur y suroeste del área de estudio. Da una idea de las posibles localizaciones de una intervención territorial, con la finalidad de aumentar las masas de *Quercus suber*. Como se puede observar, las cubiertas con alcornocal al 70% serían más propicias situarlas en las zonas de menos altitud, con pendientes menos acusadas y unas litologías menos duras, en la zona noreste y la parte más meridional.

Estas zonas, apenas presentan vegetación en la actualidad, salvo la zona noreste, donde existe presencia tanto de alcornocales con una cubierta del 70%, así como unas pequeñas manchas de cubiertas del 30% y también alguna representación de *Quercus ilex rotundifolia* y *Quercus pyrenaica*. En esa misma zona, pero más cerca del límite del área estudiada, aparece mezcla de *Calluna vulgaris.* La zona sur y noroeste que resulta adecuada para la implantación de la cubierta al 70%, en la actualidad apenas se encuentra ocupada por vegetación más allá de *Calluna vulgaris*.

Los píxeles de color arena (figura 2) son las zonas más viables para las cubiertas de *Quercus suber* en un porcentaje del 30%. Estas zonas se encuentran en el área central, noroeste y los límites orientales estudiados.

El mapa de vegetación traslada una presencia central actual variada, como son cubiertas de tomillar y lastonar mixtos, distintas coberturas, en cuanto a porcentajes, de *Quercus suber,* mezcla de *Q. faginea* y *Q. ilex rotundifolia* y *Pinus sylvestris*. Pero de nuevo, buena parte del área resultante carece de vegetación en la actualidad.

El mapa de altitudes arroja valores de la misma más elevadas a las zonas resultantes como propicias para la implantación de cubiertas del 30%, estando los valores entre los 1300 y los 800 m. Es a partir de los 800 m cuando se dan cubiertas con porcentajes del 70%. Se puede observar que a partir de los 1300 m no aparecen píxeles de viabilidad de cubierta de ningún porcentaje.

El factor pendiente es el causante de la ausencia de píxeles en la zona sureste, por ser está superior al 50%. Las zonas más llanas son más propicias para cubiertas del 70%, mientras que las que donde se pasan de 18% de pendiente, se hace más viable una cubierta del 30%.

El mapa de unidades morfolitológicas muestra como en las laderas bajas de fondos de valle sobre pizarras, en las laderas bajas sobre areniscas y limolitas, en los depósitos aluviales, así como en los relieves en cuesta sobre dolomías, calizas y margas, glacis y piedemontes en ligeras rampas de conglomerados, limos y arenas, las probabilidades de viabilidad de ocupación con una cobertura del 70% de *Quercus suber* es mayor. Las unidades morfolitológicas menos propicias para la viabilidad del alcornocal tanto en el 30% como en el 70% de cobertura total, son unidades de laderas medias y altas sobre areniscas y limolitas. En el caso de las probabilidades de viabilidad de una cubierta del 30%, son mayores en también en las unidades anteriores y en las laderas altas sobre cuarcitas, areniscas y microconglomerados. Esto se debe a la interacción de los demás factores.

Todos los datos de los factores intervinientes se agrupan según la cubierta establecida, de manera que la mitad de los datos corresponden a cubiertas relacionadas con *el Quercus suber*, siendo la correspondiente a una cubierta del 70% unos 60 datos, mientras que de cubiertas del 30% llegan a los 118. El resto de datos

(167) corresponden a otras cubiertas tales como *Pinus pinaster, Pinus sylvestris*, tomillares mixtos, romeral mixto, tomillar mixto, pastizal estacional.

Tabla 1. Presentación de datos. Elaboración propia

	P. Enero	*TM Enero*	*tm Enero*	*Pendiente*	*Altitud*	*Quercus*
Recuento	339	339	339	339	339	339
Media	32,78	7,49	-1,60	33,14	156,07	1,17
Desviación típica	3,77	0,55	0,58	12,77	43,63	0,89
Mínimo	25,00	6,10	-2,80	2,86	52,00	0,00
25%	31,00	7,10	-1,90	24,64	122,00	0,00
50%	33,00	7,40	-1,70	32,49	152,00	1,00
75%	35,00	7,80	-1,40	40,17	190,00	2,00
Máximo	42,00	8,80	0,00	70,24	242,00	2,00

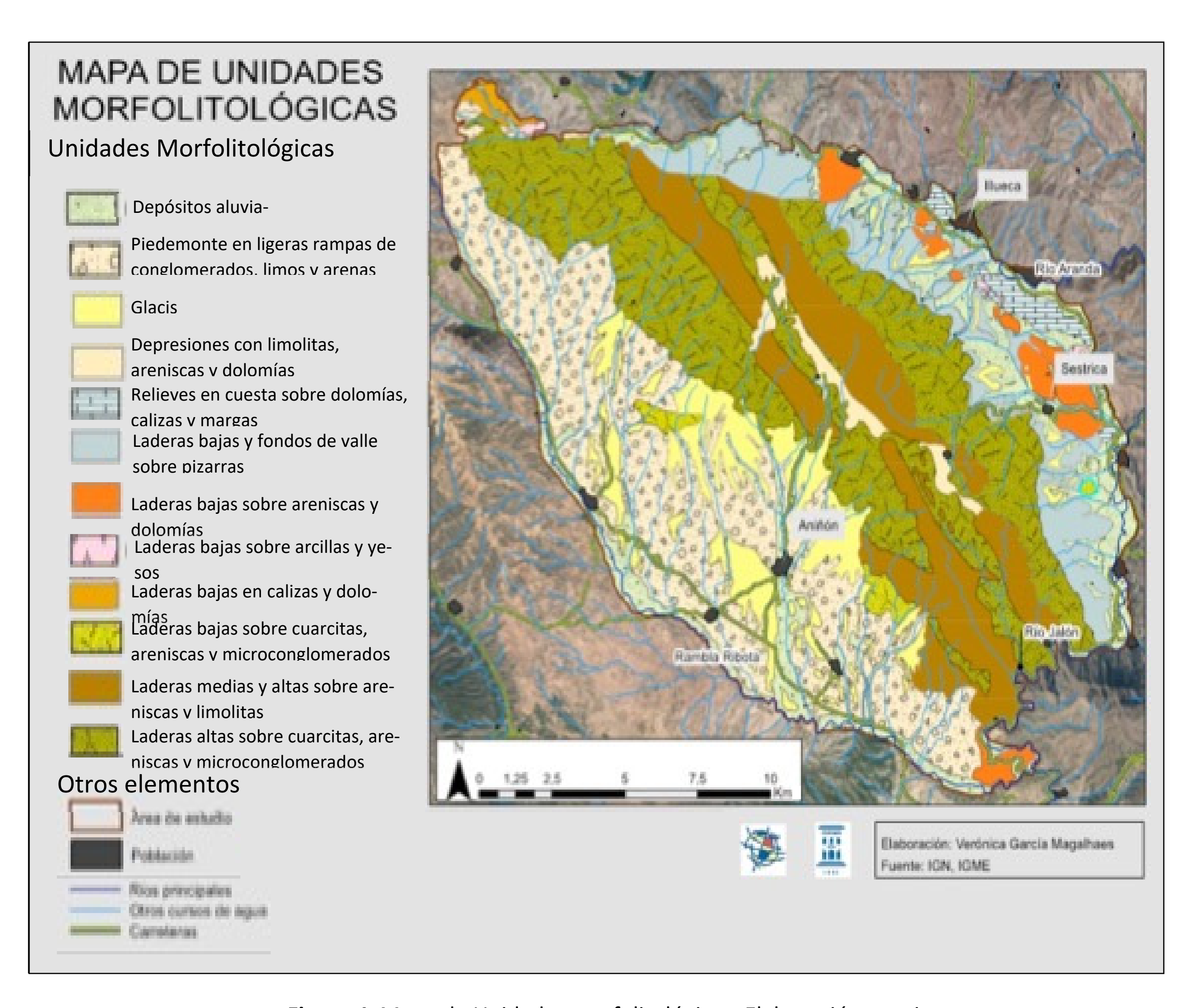


Figura *1*. Mapa de Unidades morfolitológicas. Elaboración propia.

La tabla obtenida nos da como resultado el mapa Figura 2. Mapa de distribución de áreas favorables para albergar *Quercus suber* en relación con el porcentaje de ocupación de suelo.

Este análisis predictivo da información de la viabilidad de las plantaciones desde un punto de vista climático y físico.

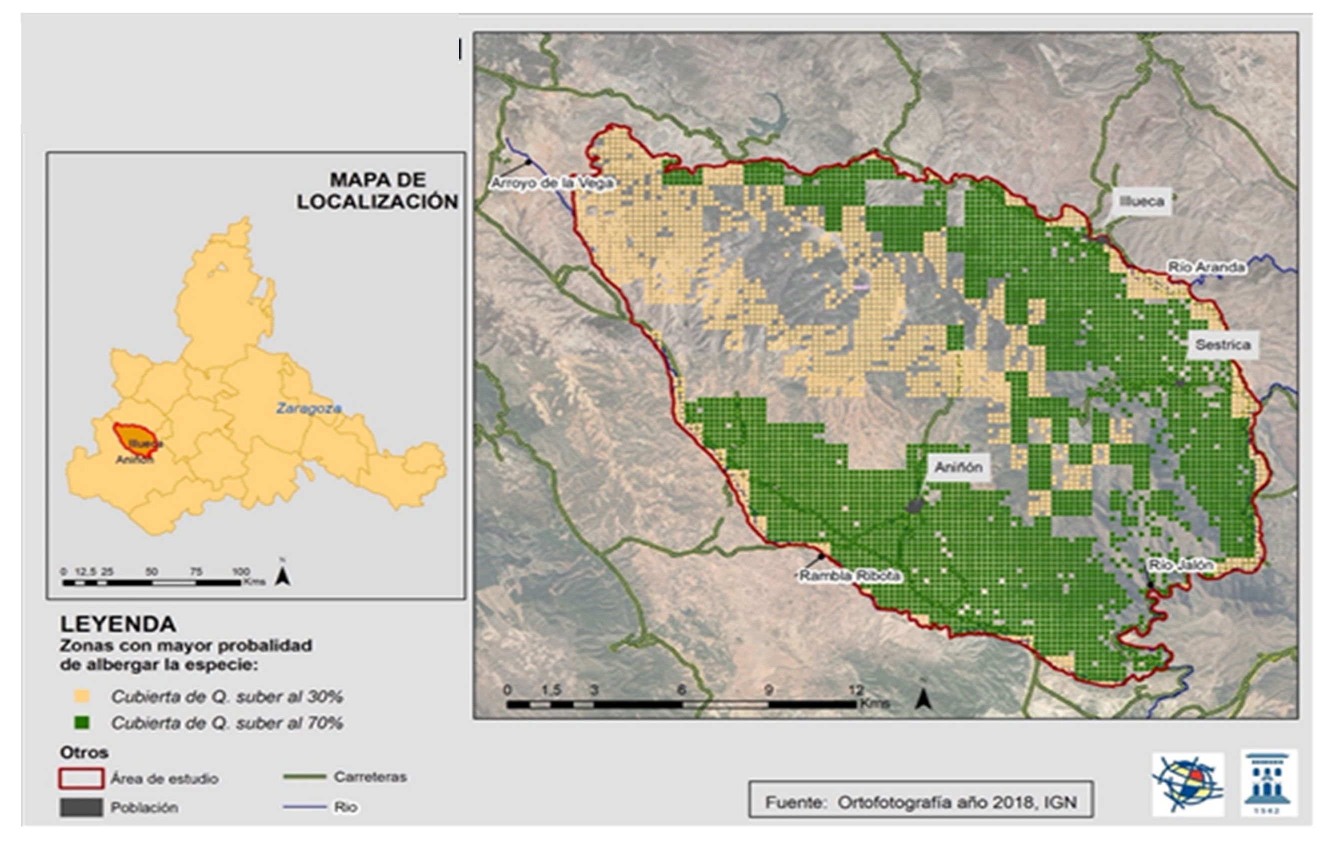


Figura 2. Mapa de distribución de áreas favorables para albergar *Quercus suber* en relación con el porcentaje de ocupación del suelo. Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

Se han obtenido unos porcentajes de precisión de los datos entrenamiento de un 81,06%, lo que consideramos un dato elevado para este tipo de modelos predictivos. Probablemente con un mayor número de datos y una precisión mayor de algunas variables se podría incrementar este y reducir el margen de error en la predicción.

En el manejo de gran cantidad de datos cabe la posibilidad de usarlos de forma reactiva, pero gracias al machine learning, se puede llevar a cabo análisis proactivos, actuando antes de que existe el problema, como ya lo hacen las empresas que necesitan para sus intereses encontrar patrones de comportamiento que detectan objetivos o clientes.

Ese manejo de cantidad ingente de datos no es posible de analizar por una persona para obtener conclusiones y menos todavía para hacer predicciones. Sin embargo, los algoritmos sí pueden detectar patrones de comportamiento.

Como podemos observar, el mapa de la figura 2, muestra un margen muy amplio de actuación sobre el terreno. Se hace necesario afinar el modelo con datos de tipo de suelo o parámetros de humedad en el suelo y ambiental, pero las probabilidades de incrementar la mancha de *Quercus suber* según el modelo obtenido en la Sierra de la Virgen son amplias, tanto en manchas con una cubierta de más del 70%, como en cubiertas del 30%.

Este tipo de formaciones vegetales, con aspecto adehesado y que conllevan un acervo cultural asociado a un tipo de explotación tradicional, puede dar lugar a un incremento de esta formaciones, constituir un valor que ayude a incrementar los elementos favorables que pueden ser un punto a favor en la lucha contra la despoblación rural, fijando población a partir de la explotación de corcho o de la utilización del espacio como un elemento de patrimonio natural y de turismo de naturaleza. Este turismo de naturaleza y

conservación patrimonial natural han de aplicarse a partir del Código Ético Mundial para el Turismo "con el fin de maximizar la contribución socioeconómica del turismo y minimizar a la vez los posibles impactos negativos que pudiera tener" (unwto.org).

5. BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, E. T. (2003). Experiencias sobre regeneración natural de alcornoque (Quercus suber L.). *Actas de la III Reunión sobre Regeneración Natural-IV Reunión sobre Ordenación de Montes*, 11.

Badía-Villas, D., Poch, R. M., Longares, L. A., Yuste, A., & Bauluz, B. (2021). Stability of Textural Pedofeatures in the Siliceous Iberian Chain (NE Spain). *SSRN Electronic Journal*. https://doi.org/10.2139/ssrn.3940882

Badía-Villas et al. - 2021—Stability of Textural Pedofeatures in the Siliceou.pdf. (s. f.).

Bejarano Palma, R., & Rubio Recio, J. M. (2018). Biogeografía: Una revisión sobre su papel, su trayectoria y sus contenidos. *Estudios Geográficos*, *60*(237), 545. https://doi.org/10.3989/egeogr.1999.i237.577

Blanco Castro, E. (2005). *Los Bosques ibéricos: Una interpretación geobotánica*. Planeta.

Centro de Estudios Bilbilitanos, & Institución «Fernando el Católico.» (Eds.). (1997). *Cuarto Encuentro de Estudios Bilbilitanos: [Calatayud y comarca]: actas*. Centro de Estudios Bilbilitanos ; Institución «Fernando el Católico».

Convention on biological diversity. (1998). https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-en.pdf

Diaz-Esteban, M. (2009). *Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España[*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. https://www.uv.es/jgpausas/papers/Diaz-2009-habitats.pdf

Diaz-Fernándezi, P. M., & Gallardo MUÑoz, M. (1996). Alcornocales marginales en España. Estado actual y perspectivas de conservación de sus recursos genéticos. *Ecología*, *10*, 21-47.

Fernández-Cancio, A., Sánchez-Salguero, R., Gil, P. M., Manrique Menéndez, E., Fernández Fernández, R., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2012). Efectos del cambio climático sobre la distribución de los alcornocales españoles. Una aproximación fitoclimática para la futura gestión. *Ecosistemas*, *21*(3), 50-62. https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.07

Fibla, N. C. (2019). *Aplicación de la micromorfología al estudio de suelos forestales del Sistema Ibérico* [Trabajo fin de Grado]. Repositorio de la Universidad de Zaragoza – Zaguan http://zaguan.unizar.es

Gento Arranz, I. (2016). *Entre naturaleza y cultura: El alcornocal de la dehesa de Foncastín* [Trabajo Fin de Grado]. Universidad de Valladolid.

Guerra Delgado, A., & Monturiol Rodriguez, f. (1970). *Mapa de suelos de las provincias de Zaragoza, Huesca y Logroño* [Map]. CSIC.

Gutiérrez Hernández, O., Cámara Artigas, R., Senciales González, J. M., & García, L. V. (2018a). Modelos predictivos en Biogeografía: Aplicación para la modelización de nichos ecológicos en Geografía Física. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, *78*, 88-126. https://doi.org/10.21138/bage.2395

Gutiérrez Hernández, O., Cámara Artigas, R., Senciales González, J. M., & García, L. V. (2018b). Modelos predictivos en Biogeografía: Aplicación para la modelización de nichos ecológicos en Geografía Física. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, *78*, 88-126. https://doi.org/10.21138/bage.2395

Hernández, J. Millán J. y Serra, A. (2007). *Comarca del Aranda*. Diputación General de Aragón, Departamento de Presidencia Y Relaciones Institucionales, Zaragoza.

Longares Aladrén, L. A., Girona García, A., Martí Dalmau, C., BadíaVillas, D., Ortiz Perpiñá, J. O., Mora Hernández, J. L., De Luis Arrillaga, M., Saz Sánchez, M. Á., & Zufiaurre Galarza, R. (s. f.). *Caracterización ecológica de los alcornocales de la provincia de Zaragoza.*

Maldonado J., Benito M, Sánchez de Dios R., Sainz H. (2014). *Evolución reciente de las áreas de los bosques esclerófilos Ibéricos. Cambios deducidos a partir de la cartografía foresta*. https://www.researchgate.net/publication/264869406_EVOLUCION_RECIENTE_DE_LAS_AREAS_DE_LOS_BOSQUES_ESCLEROFILOS_IBERICOS_CAMBIOS_DEDUCIDOS_A_PARTIR_DE_LA

Manual de gestión del Habitat: Ficha de manejo y conservación. (2011). Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente. Gobierno de Aragón.

Moreno, C. E. (2020). *Métodos para medir la biodiversidad*. 86.

Quezel, P., Tomaselli, R., Morandini, R., & Crespo, M. (1982). *Bosque y maquia mediterráneos: Ecología, conservación y gestión*. Serbal.

Raschka, S., & Mirjalili, V. (2019). *Python machine learning: Aprendizaje automático y aprendizaje profundo con Python, scikit-learn y TensorFlow*.

Rodriguez Urbieta, T. I. (2008). *Estructura, dinámica y regeneración de los bosques mixtos de alcornoque (Quercus suber) y quejigo moruno (Quercus canariensis Willd.) del sur de la Península Ibérica*. Universidad de Alcalá de Henares.

Rodríguez-Barbero, C. (2009). *Fenología de Quercus ilex L. y Quercus suber L. en una dehesa del centro peninsular.* Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal.

Rubio Recio, J.Manuel. (1989). *Biogeografía. Paisajes vegetales y vida animal* (Sintesis, Vol. 1-18). Sintesis.

Sánchez Palomares, O., Jovellar, L., Sarmiento, L., Rubio, A., & Gandullo, J. (2007). *Las estaciones ecológicas de los alcornocales españoles*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.

Sanmartin, I. (2012). *Biogeografia (Capítulo 45)* (pp. 457-474).

Tellería, J.L. (2013). Pérdida de biodiversidad. Causas y consecuencias de la desaparición de las especies. *Memorias De La Real Sociedad Española De Historia Natural*, *10*, 13-25.

TIG Y GEOGRAFÍA PARTICIPATIVA

Cartografía colaborativa, crowdsourcing, cartografía web… / Ciencia ciudadana, información voluntaria, SIG de participación pública…



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 153-162

IDEGEOHIS: un camino de la plancheta al webmapping

L. García Juan[1], C. Almonacid Ramiro[2], Y. Villar[1]

[1] Departamento de geografía, Universidad Autónoma de Madrid. Campus Cantoblanco, Madrid.
[2] SCUAM, Universidad Autónoma de Madrid. Campus Cantoblanco, Madrid.

laura.garciaj@uam.es, carlos.almonacid@uam.es, yaiza.villar@uam.es

RESUMEN: Webmapping, IDE, opendata o Big Data han pasado de tecnologías emergentes a convertirse en un conjunto plenamente consolidado. No obstante, existe un campo, el de la geografía histórica donde estas tecnologías, aunque han iniciado el mismo recorrido seguido en otras disciplinas, aún no lo han completado. En el pasado, el uso de distintas geotecnologías facilitó la apertura de los archivos ofreciendo en red importantes datos tanto textuales como cartográficos. Para dar el siguiente paso y utilizar tecnologías webmmaping se requiere del desarrollo y la construcción de métodos con los que transformar y estandarizar los geodatos históricos. Algunas de estos primeros pasos ya han comenzado y son distintos grupos los que han trabajo y continúan realizando valiosas aportaciones en la línea de lo planteado. El referente más próximo se halla en los entornos y procedimientos de los datos actuales, aunque siempre considerando las particularidades históricas. Desde IDE-GEOHIS se persigue el establecimiento de estándares que, aunque desarrollados a través de ejemplos concretos, caminen hacia modelos globales. Presentamos un prototipo desarrollado con dos fuentes geohistóricas, el Nomenclátor de Floridablanca y el Catastro de Ensenada, abierto a la comunidad, y, que, partiendo de la geocodificación de las poblaciones existentes a finales del siglo XVIII, permite asociar, analizar y visualizar espacialmente distintas variables socio-económicas.

Palabras-clave: webmapping, geocodificación, fuentes geohistóricas, IDE.

1. INTRODUCCIÓN

Desde la aparición de los primeros SIG hasta llegar al momento actual, las herramientas y metodologías utilizadas para la creación, gestión y tratamiento de geodatos han vivido una auténtica revolución. En las últimas décadas han sido numerosos los trabajos que se han centrado en esta temática. Unas publicaciones cuyo análisis permite ver la imparable transformación que se está produciendo en este campo. Hoy en día hablamos de geotecnologías como un concepto que abarca múltiples herramientas, metodologías, softwares… con los que podemos gestionar y tratar todo tipo de cuestiones. Todas ellas están asociadas a una gran heterogeneidad de áreas de conocimiento que se ven beneficiadas de todo su potencial. Este proceso ha venido parejo al desarrollo tecnológico al que asistimos en las últimas décadas, y en las que el foco de atención ha estado puesto en los GPS, el manejo de grandes cantidades de información y en Internet. La conjunción de estos tres elementos ha llevado a una metamorfosis en la que se ha pasado de los SIG escritorio a un mundo en red, donde los datos circulan de forma libre y organizada a través de estándares e IDEs (figura 1), que, gracias a los geoportales, facilitan su interoperabilidad. Este es un mundo que va más allá de los especialistas y ha llegado a la sociedad con un papel cada vez más activo tanto como consumidora como productora de geodatos. Es un cambio que se ha propiciado en por la extensión de los GPS vinculados a todo tipo de dispositivos, y que nos ha llevado a vivir en un mundo no solo interconectado sino también geoposicionado.

Dentro del marco general descrito han ido apareciendo distintas soluciones tecnológicas que, sobre todo motivadas por corrientes como el software libre, ofrecen entornos de trabajo libres y fáciles de emplear, con los que, por ejemplo, diseñar geoportales donde mostrar información geográfica de forma interactiva.



Figura 1. Infraestructura de datos espacial española (www.idee.es).

Sin embargo, como desarrollaremos a continuación, dentro de esta tendencia no todos los datos tienen cabida ni son tratados de la misma manera. Más allá de los históricos de datos, cada vez se trabaja con datos generados en épocas pretéritas. En estos casos, en el momento de su generación no se desarrolló ningún entorno tecnológico para crearlos, ni existían normas que marcaran su estructura. Nacieron en un contexto donde la tecnología directamente no existía. Ahora bien, los numerosos intentos que se han ido realizando para dotarlos de las mismas funcionalidades a través del empleo de las geotecnologías más extendidas han dado prometedores resultados. Los datos históricos pueden, y deben beneficiarse, de las mismas ventajas tecnológicas que los actuales. Una afirmación que requiere de la elaboración de una estrategia compleja. La base de todo este sistema se halla en contar con datos que posean unas coordenadas unívocas. Con este paso se puede dar el salto y comenzar a mostrar cartografía y bases de datos geoespaciales online que nos acerque a aspectos muy variados de centurias clave como el siglo XVIII, como por ejemplo para entender cambios en los procesos de transformación del campo o la introducción de la industrialización. Un proceso que debe seguir la estela de lo seguido con la codificación de ubicaciones actuales, pero que también tiene que mantener su propia idiosincrasia, con la que responder a una realidad más compleja, que, a su vez, también debe ser integrada en el resultado final.

1.1. Marco de estudio: fuentes geohistóricas y su relación con las geotecnologías

A través de esta comunicación centraremos el foco de estudio en la geografía histórica, la rama de la geografía humana que mira de forma retrospectiva al mundo, sus gentes y su evolución (Batista da Costa, 2021). Se trata de una disciplina que no ha dejado de crecer, atrayendo cada vez más a especialistas provenientes de distintas ramas de conocimiento. Este interés que ha conseguido suscitar, en gran parte ha venido determinado por su capacidad para mirar al pasado con la finalidad de comprender el presente. Una cuestión transcendental y necesaria en un momento en el que tratamos de desarrollar políticas sostenibles y en los que, en conjunto, como sociedad, queremos cumplir una agenda común, los ODS (Esteban, 2021).

Para trabajar en el campo de la geografía histórica fundamentalmente se recurre al empleo de las conocidas como fuentes geohistóricas. Un gran contenedor de datos heterogéneos que combinan información geográfica e histórica. De forma tradicional, estas se han venido clasificando en dos grandes bloques, en relación con su tipología documental. De esta forma nos encontramos con fuentes de tipo textual frente a las cartográficas. Una división que se ha venido mantenido en el tratamiento, desarrollo y uso de las distintas aplicaciones tecnológicas que han ido surgiendo. Un camino en el que podemos afirmar que el conjunto cartográfico es el que más se ha visto beneficiado de estas novedades. Ahora bien, esta dicotomía de base no es clara, y datos textuales con cartográficos aparecen unidos ofreciendo una información complementaria que no se debe disgregar (figura 2).



Figura 2. Mapa de la frontera hispano-portuguesa elaborado por el ingeniero militar Antonio Gaver (https://bibliotecavirtual.defensa.gob.es/BVMDefensa/es/consulta/busqueda.do).

Centrándonos en los cambios que la tecnología ha introducido en el manejo de estas fuentes, hay un hecho que es necesario resaltar, ya que constituye el detonante que propició su gran extensión en cuanto a su uso. Como un reflejo de lo que ocurría con datos actuales, las fuentes atesoradas en archivos históricos se fueron abriendo a la red, y se les dotó de entornos tecnológicos que facilitaban su acceso (figura 3). Nacían así los primeros visores y geoportales, y también catálogos que comenzaban a tener asociados datos digitalizados en red, como el portal PARES de los archivos españoles. En este ascenso en el uso de la tecnología, el Instituto Geográfico Nacional (IGN), allá por el año 2010, con las hojas kilométricas daba un paso más allá y desarrollaba los primeros servicios OGC, con un WMS que facilitaba el estudio de un conjunto cartográfico único (Capdevila, 2009). Por su parte, el Servicio de Cartografía de la UAM (SCUAM) entre los años 2015 y 2016 constituyó un servicio WMS (http://guiadigital.uam.es:8080/geoserver/Atlas_Coello_UAM_WMS/wms?) con todos los mapas provinciales del Atlas de España y de sus posesiones de Ultramar impresos por Francisco Coello a mediados del siglo XIX cuya colección completa se encuentra en los fondos de la Cartoteca Rafael Mas de la propia Universidad Autónoma de Madrid. El trabajo ha continuado con la creación de otro servicio WMS para los mapas del Atlas Geográfico de España de Tomás López (http://guiadigital.uam.es:8080/geoserver/atlas_lopez_UAM_WMS/wms?). El objetivo es la puesta a disposición pública de las colecciones georreferenciadas de los mapas más relevantes de la historia de nuestra cartografía que, próximamente, se irán completando con el Atlas Marítimo de Vicente Tofiño y otros (Almonacid, 2019).



Figura 3. Visor comparado de mapas antiguos IGN (https://www.ign.es/web/mapasantiguos/index.html).

Como se puede comprobar los principales esfuerzos han estado centrados en las fuentes cartográficas, un hecho al que ya habíamos aludido y que tras este pequeño estado de la cuestión queda constatado (Cascón-Katchadourian, 2019). Las fuentes de tipo textual a través de su mejora en la accesibilidad también han visto como su uso se ha multiplicado, aunque sin unos entornos de gestión y visualización unificados (Díez López, 2012). Se trabaja sobre todo en el empleo de geotecnologías concretas para casos puntuales.

1.2. Objetivos: hacia una integración de datos textuales y cartográficos

En la línea de lo expresado anteriormente surgió SIGECAH, una iniciativa que buscaba dotar de un entorno de trabajo abierto, creado en el seno de una comunidad participativa, el trabajo con fuentes geohistóricas. Este primer acercamiento fue evolucionando y en la actualidad se corresponde con IDE-GEOHIS. Un grupo multidisciplinar de investigadores interesados en las mismas temáticas, pero ahora con la mente puesta en la creación de una infraestructura de datos propia para esta tipología documental (García et al., 2018). Una ambiciosa meta que requiere de pequeños pasos como el que se quiere mostrar con esta comunicación. Concretamente, el objetivo, dentro de la filosofía de trabajar ofreciendo una solución global a toda la comunidad interesada en fuentes geohistóricas, se centra en prestar ayuda para la conversión de esta tipología y todo su contenido, en información geocodificada. Es este uno de los pequeños pasos que se requiere llevar a cabo antes de pensar en el uso de otro tipo de geotecnologías asociadas. Aunque no están provistos de unas coordenadas las fuentes geohistóricas cuentan con suficientes elementos que permiten, mediante un proceso metodológico basado en el estudio del pasado, su asociación a un espacio unívoco pero cambiante. De esta forma, muchas fuentes históricas son, o pueden convertirse, en bases de datos geoespaciales perfectamente estandarizadas. Se busca algo básico, pero con gran peso, que toda la información histórica pase a estar georreferenciada con las consiguientes ventajas que quedan fuera de toda duda (Ingelmo, 2012).

En condiciones normales el proceso de geocodificar se puede llevar a cabo de forma casi automática a través del empleo de cualquier SIG comercial. Dadas una serie de particularidades, para el caso de los datos históricos no es tan sencillo ni se puede tender a simplificar reduciéndolo a una asociación con la realidad actual. Aquí es clave poder capturar siglos de cambios en la evolución administrativa. La clave está en diseñar un modelo de datos que facilite esta labor. Una base de datos geoespacial almacena de forma organizada tanto la geometría como la información temática asociada a ella. Más allá de esta importante particularidad también permite la realización de estudios espaciales. En su desarrollo se van a regir por los mismos principios y reglas vigentes en la construcción, diseño e implementación de cualquier otra base de datos. En este sentido, y deteniéndonos en el modelo seguido, los relacionales son la solución más acertada para los objetivos y requerimientos derivados de las fuentes geohistóricas. Y es que, fundamentalmente se requiere el establecimiento de conexiones entre distintas entidades, construyendo de esta forma un gran sistema que facilita el estudio de múltiples variables. Esta forma escalar también contribuye al desarrollo de sistemas complejos partiendo de subsistemas más concretos.

2. CONSTRUYENDO UNA CARTOGRAFÍA GEOHISTÓRICA DE BASE

Poniendo en práctica los principios anteriores el núcleo del trabajo que presentamos se centra en el desarrollo de una capa de tipo punto que, de forma básica, transforme las ubicaciones en datos geográficos precisos, rastreando los diferentes nomenclátores existentes hasta llegar al actual. Ahora bien, de forma paralela se debe también modelar otras entidades temáticas que permitan monitorizar los diferentes cambios acaecidos a lo largo de una línea temporal que nace en el siglo XVIII. Dado lo experimental del proceso y pensando en la escalabilidad de este a partir del uso de IA otro requerimiento se basa en la recogida y estandarización del proceso seguido. Para ello, el punto clave de nuevo se sitúa en las fuentes empleadas en esta labor de rastreo. El gran reto a la hora de llevar a cabo una propuesta de este tipo, y con la que se facilite la geocodificación semiautomática, se encuentra en la dificultad de normalizar distintas realidades administrativas (Sánchez Domingo, 1996), concepciones espaciales y hasta cuestiones más básicas que se centran en la grafía de los propios topónimos. Un proceso que desde la experiencia de los autores mostramos a continuación. De entre toda la realidad territorial de la Corona de Castilla en la centuria de las luces y para facilitar esta primera aproximación, se ha seleccionado un espacio que actúa como piloto. Concretamente trabajaremos en una pequeña comarca situada al suroeste de la provincia de Salamanca, la llamada Tierra o partido de Ciudad Rodrigo (figura 4).

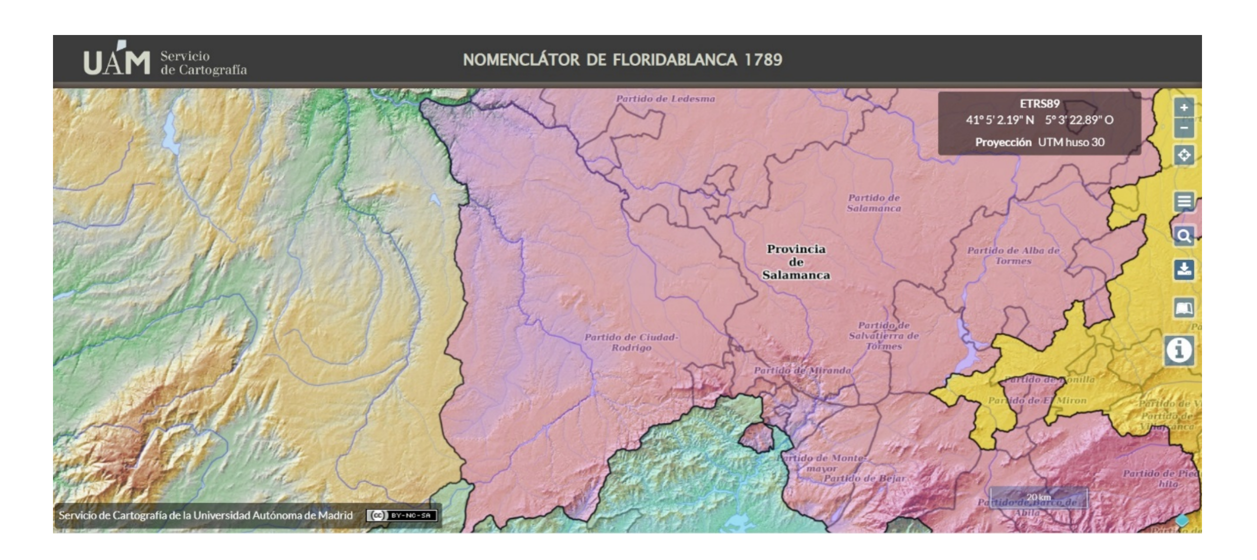


Figura 4. Visor desarrollado para mostrar los resultados obtenidos y en el que se muestra el área de estudio (https:// http://guiadigital.uam.es/floridablanca_vectorial/visor.php).

2.1. Punto de partida

Como ya se ha indicado, son muchas las iniciativas desarrolladas en la línea que presentamos. Algunas de ellas han tratado de normalizar la realidad homogeneizándola y vinculándola a un único punto presente en la realidad actual (Mastral Gascón de Gotor, 2013). En otros casos, normas actuales como la directiva INSPIRE tienen en cuenta cambios en la grafía o la asociación a una lista de unidades administrativas, pero de nuevo pensando en la homogeneidad (https://inspire.ec.europa.eu/id/document/tg/gn).

Junto con el empleo de estos ejemplos externos, para el desarrollo de este objetivo y con la meta final del futuro establecimiento de una IDE geohistórica, hemos partido de dos experiencias desarrolladas dentro de IDE-GEOHIS, muy relacionadas, en las que se perseguían los mismos objetivos que se han fijado en esta comunicación. Por un lado, tomaremos como ejemplo el Catastro de Ensenada (1749-1759). Se trata de una fuente compleja y que atesora un gran volumen de datos tremendamente ricos (Camarero Bullón, 2002). En sí misma debemos hablar de ella como un conjunto documental con distintos niveles de agregación que van desde datos individualizados hasta llegar a obtener una foto fija de la intendencia como división administrativa superior. Entre medias, los datos parten o se asocian en base a núcleos con alcabalatorio independiente. Como resultado contamos con una serie de documentos (Respuestas Generales, memoriales, estados, Libros de lo Real, libros de cabezas de casa…) que son verdaderas fuentes en sí mismas cada uno de ellos. Vinculado con el Libro de lo Real del Catastro de Ensenada, en base a la citada iniciativa SIGECAH se desarrolló un modelo de datos con la finalidad de poder aunar inicialmente los datos contenidos en el Catastro de Ensenada para luego ampliarse hacia otras fuentes geohistóricas de tipo catastral y paracatastral. En su diseño surgió la necesidad de aunar realidades administrativas diferentes en función de la fuente de partida. Para ello, se optó por una basada en la generación de un histórico de cambios administrativos que se fueron experimentando (García Juan et al., 2011).

La otra iniciativa de la que partimos se asocia a otra gran fuente geohistórica, el nomenclátor de Floridablanca (1785 -1787, pub. 1789). En este caso se trata de una fuente mucho más sencilla que ofrece los nombres de todas las "poblaciones" del reino con su adscripción a provincia y partido, o sus equivalentes, junto a otros datos, como su tipo de jurisdicción o el tipo de alcalde u oficial que las rige y unos pocos datos más en algunos casos.

2.2. Del hoy al ayer, una labor de rastreo a través de la toponimia

Inicialmente, trabajaremos a un nivel de escala asumible, el de localidad o población, georreferenciada a través de un par de coordenadas, es decir, mediante un punto o posición geográfica. Las fuentes geohistóricas no cartográficas solo muy excepcionalmente incluyen coordenadas. Habitualmente, sus referencias territoriales están asociadas a nombres de localidades o de otras entidades geográficas. Por todo ello, la asignación de coordenadas ha de ser indirecta, utilizando esos nombres y/o referencias para llevar a cabo una identificación con entidades equivalentes en la cartografía actual, ya con coordenadas geográfi-

cas.

El proceso se inicia estudiando los topónimos provenientes del listado de las poblaciones recogidas en el tomo 1 de Floridablanca, para la parte histórica, y del Nomenclátor del año 2000 del IGN, para la actual. En esta etapa surge el problema, y al que ya hemos hecho referencia, de vincular a un mismo punto distintos cambios administrativos. El Nomenclátor actual esta desagregado según la realidad presente, pero en 1785 el corregimiento de Ciudad Rodrigo se extendía por las actuales provincias de Salamanca y Cáceres, haciendo necesaria la selección de ambas para poder llevar a cabo la vinculación. En ningún caso existe ningún campo que nos permita restringir la búsqueda a un ámbito más concreto que fuera asimilable al de la situación histórica (figura 5).

Resultado de la Búsqueda de Localidades

Volver | Información sobre el resultado

Estos resultados se pueden reordenar alfabéticamente pulsando la cabecera de cualquier campo.

1067 resultados de la Búsqueda de Localidades que empiezan por "" en la provincia de "Salamanca"

Localidad Actual	Localidad Antigua	Entidad Principal	Provincia Actual	Provincia Antigua	Entidades Menores / Observaciones
Nava del Buen Padre	La Nava de Buen Padre	Ciudad Rodrigo / Sancti-Spiritus	Salamanca	Salamanca	-
Navacarros	Nava Carros	Béjar	Salamanca	Salamanca	Incluye los barrios agregados de Casas del Fraile; Palomar Alto y Palomar Bajo
Navacepeda de Tormes	Nava Zepeda de Tormes	Piedrahita	Ávila	Salamanca	-
Navadijos	Navadijos	Piedrahita	Ávila	Salamanca	-
Navaescurial	Navaescorial	Piedrahita	Ávila	Salamanca	-
Navagallega	Navagallega	Salamanca	Salamanca	Salamanca	-
Navahermosa de Corneja	Navahermosa	El Mirón / Santa Maria del Berrocal	Ávila	Salamanca	-
Navales	Navales	Alba de Tormes	Salamanca	Salamanca	-
Navalmoral de Béjar	Navalmoral	Béjar	Salamanca	Salamanca	-
Navalonguilla / Navalguijo	Navalonguilla	El Barco de Ávila	Ávila	Salamanca	Se llama el lugar de Navalonguilla, a que se halla agregado el lugar o barrio que nombra Navalguijo

Figura 5. Ejemplo de localidades con cambios administrativos en el área de estudio obtenidas a partir del portal PARES (http://pares.mcu.es/Catastro/servlets/ServletController?ini=0&accion=0&mapas=0&tipo=0).

Salvado este paso, y pasando a la identificación de localidades, la automatización de todas las equivalencias, aunque posible, es compleja. La concordancia completa entre nombres en ambas fuentes de datos se da en contadas situaciones. Por tanto, y en este momento del proyecto, hemos utilizado una identificación caso a caso, apoyada únicamente en el orden alfabético de ambas fuentes. Solo en determinados ejemplos, cuando las localidades del XVIII siguen existiendo hoy en día y sus nombres y su ortografía no han variado en demasía, la identificación puede ser inmediata. En este proceso no solo la toponimia es importante, sino que, por el contrario, resulta de gran ayuda acudir a las fuentes cartográficas más cercanas a la fuente de tipo textual que estamos georreferenciando. En nuestro caso, los mapas de Tomás López disponibles en un servicio WMS del propio SCUAM o, incluso los del Atlas de Coello, casi un siglo posterior, son los dos grandes referentes.

Las dificultades se tornan más complejas, incluso insalvables, en el caso de localidades desaparecidas o no recogidas como tales en la cartografía actual. En esos casos, las labores de búsqueda requieren de otras fuentes que apoyen la localización, como los diccionarios históricos (Madoz, Miñano...), las propias Respuestas Generales del Catastro de Ensenada, las recopilaciones toponímicas o la bibliografía especializada. En estas fuentes, encontramos referencias que nos permiten ubicar las poblaciones del Nomenclátor de Floridablanca en una determinada posición con mayor o menor precisión y solo en contadas monografías y estudios se nos ofrecen pares de coordenadas geográficas.

Finalizado este proceso de identificación de las poblaciones del Nomenclátor de Floridablanca obtenemos una capa de puntos con coordenadas geográficas a las que se asocian los siguientes datos en forma de tabla:

- Un código numérico único para cada punto
- Su nombre en el Nomenclátor de Floridablanca, respetando la ortografía original
- La fuente cartográfica de la que hemos obtenido sus coordenadas, en muchos casos el Nomenclátor del año 2000 del IGN.
- Otras fuentes cartográficas utilizadas para su localización, cuando hayan sido necesarias

- Fuentes no cartográficas utilizadas en la localización. Siempre estará presente la referencia al Nomenclátor de Floridablanca, pero se añadirán otras cuando hayan sido necesarias
- Su nombre en el Nomenclátor del año 2000 del IGN o en la cartografía que hayamos utilizado para la obtención de sus coordenadas (en los casos de ausencia del Nomenclátor actual). Cuando las coordenadas se hayan obtenido a partir de una posición sobre la cartografía actual y no mediante su identificación con una entidad con nombre, se indicará 'posición' en lugar de un nombre.
- Su nombre en el Atlas de Tomás López, siempre que esté recogida en él
- Su provincia actual, según la cartografía del IGN
- Su tipo de entidad, actualmente según el Nomenclátor del IGN (municipio, capital de municipio, entidad de población, entidad menor, territorio anejo, etcétera) o según la cartografía utilizada para la obtención de sus coordenadas (paraje, población en ruinas, ermita, granja, dehesa, etcétera). Cuando las coordenadas se hayan obtenido a partir de una posición sobre la cartografía actual y no mediante su identificación con una determinada entidad, se indicará 'posición' en lugar de un tipo de entidad.
- Su tipo de entidad según el Nomenclátor de Floridablanca (Villa, Lugar, Ciudad, Despoblado, Arrabal, etcétera)
- Su provincia/intendencia o equivalente según el Nomenclátor de Floridablanca
- Su partido/corregimiento o equivalente según el Nomenclátor de Floridablanca
- Su adscripción a otras divisiones inferiores al partido como sexmos, ochavos, campos, u otros según el Nomenclátor de Floridablanca, cuando existan en esta fuente
- Su adscripción a un determinado término según el Nomenclátor de Floridablanca, en el caso de algunas entidades menores (aldeas, barrios, arrabales, u otras)

2.3. Normalización de entidades

Continuando con el diseño de una metodología que nos permita generar una capa lo más fiable y precisa, somos conscientes de las ventajas que ofrecería una identificación de las localidades del Catastro de Ensenada con las recogidas en el Nomenclátor de Floridablanca, y en un futuro con otras fuentes, de la manera más directa posible. Siguiendo el funcionamiento de las bases de datos relacionales, esta vinculación se debería realizar a partir de la creación de un código normalizado, preferiblemente numérico, que sería introducido como un campo único de cada localidad en la capa georreferenciada y que tendría que ser añadido a las tablas de la fuente a georreferenciar. A pesar de la proximidad temporal de ambas fuentes, la dificultad de este procedimiento ha resultado similar a la que pudimos establecer cuando nos planteamos la utilización de los códigos del Nomenclátor del IGN para la conexión con el de Floridablanca. La lógica aplicada en la construcción del código INE (por ejemplo) no es aplicable a las poblaciones del Nomenclátor de Floridablanca. Las provincias han cambiado, el orden alfabético de los nombres de poblaciones no es equivalente debido a las modificaciones ortográficas, los municipios actuales (base del código INE) no son equivalentes a las localidades del siglo XVIII. En el caso del Catastro de Ensenada, la principal dificultad para su identificación con el Nomenclátor de Floridablanca viene de la grafía utilizada: manuscrita en el primero, impresa en el segundo, lo que dificulta el manejo de una ortografía equivalente. Pero también del hecho de que el tipo de entidad básica utilizada para la recopilación de datos del Catastro (la unidad con alcabalatorio independiente) no es equivalente a la "población" del Nomenclátor. La cuestión es que la construcción de un código común no resulta inmediata. Además, hay que contar con el trabajo que supone construir un código complejo en la fuente a georreferenciar del mismo modo que se haya hecho en la capa ya georreferenciada. Las ventajas serían indudables, pero es necesaria una reflexión sobre los componentes del código a utilizar y sobre su construcción automática para las fuentes a georreferenciar mediante herramientas que tendrían que ser puestas a disposición de los usuarios.

Por tanto, en este trabajo, la identificación entre los puntos de la capa del Floridablanca y las localidades presentes en el Catastro de Ensenada se ha realizado sin automatizaciones ni códigos compartidos, acudiendo a sus nombres mediante una ordenación alfabética. Pero, en esta ocasión, ya no contábamos solo con los nombres del Nomenclátor del IGN, teníamos los más próximos del propio Nomenclátor de Floridablanca, los del Atlas de Tomás López y los obtenidos de otras fuentes. Además, podíamos seleccionar los puntos con coordenadas según la misma provincia de Salamanca del siglo XVIII, según el propio corregimiento de Ciudad Rodrigo e, incluso, según sus distintos Campos, delimitando mucho los ámbitos de bús-

queda. Esta manera de proceder es la que nos puede guiar en la determinación y construcción del código único de cada entidad que proponíamos más arriba como base para una automatización del proceso.

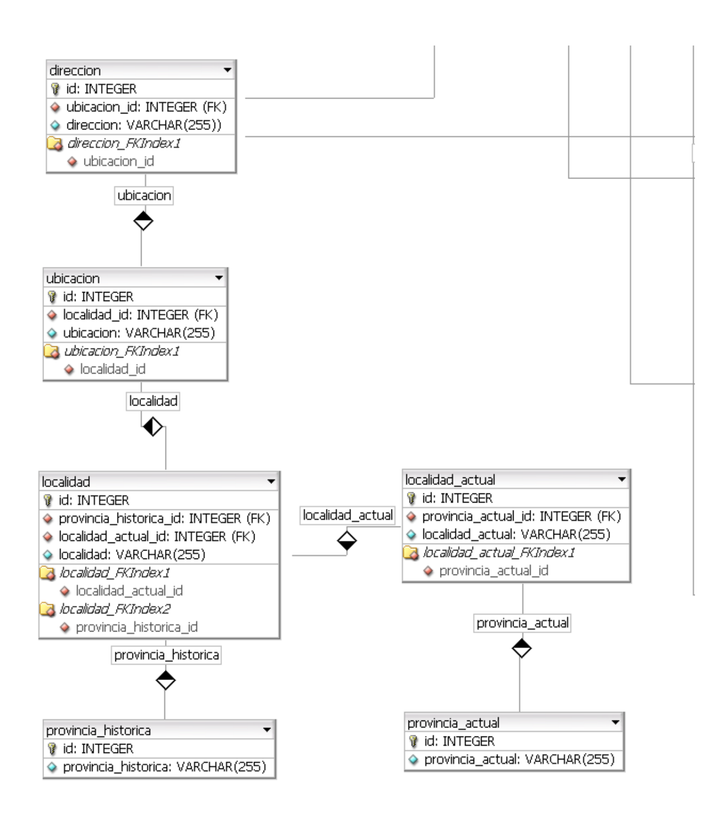


Figura 6. Fragmento del modelo de datos relacional en el que se recogen las entidades que recogen la geocodificación de los datos.

Finalmente, hay que tener en cuenta que no todas las poblaciones presentes en el Catastro de Ensenada están recogidas en el Nomenclátor de Floridablanca y viceversa. De tal modo que, al poner en juego una nueva fuente geohistórica, es necesaria la introducción de nuevos puntos en nuestra base de datos cartográfica, así como el descarte de otros. En el caso de los nuevos puntos a introducir para el Catastro de Ensenada, todos ellos son despoblados o entidades menores no presentes en el Nomenclátor actual (figura 6). Por tanto, requieren de una nueva digitalización que deberá cumplir con los mismos requerimientos empleados en los ya incorporados a partir del Nomenclátor de Floridablanca.

3. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

A través del ejemplo mostrado se trata de dar a conocer una propuesta para la geocodificación de ubicaciones pretéritas. Más allá del objetivo de normalizar un nomenclátor histórico, se busca avanzar en el uso, gestión y visualización de estos datos. Una etapa, dentro de un largo camino, necesaria si queremos no solo representar esta información geográfica en visores, sino ir más allá y comenzar a poder trabajar con ella aplicando análisis espacial en entornos webmapping. En esta línea la meta es ir elaborando una cartografía vectorial básica que facilite la representación espacial de las distintas variables contenidas en las fuentes geohistóricas. Este producto además se servirá a través de servicios WMS y WFS con los que se pretenden alcanzar un mayor grado de penetración y uso por parte de la comunidad científica que trabaja con estas tipologías documentales.

La única información verdaderamente común entre las distintas fuentes geohistóricas que estamos manejado es el nombre de las poblaciones. En este sentido, y a través de una comunidad participativa, se debe acometer un procedimiento de normalización de sus nombres para minimizar el impacto de tildes, espacios, guiones, mayúsculas, letras homófonas, grafía antigua, etcétera. Siendo este un proceso de fácil automatización. Con ello, la ordenación alfabética de todas las fuentes quedaría mucho más ajustada.

Además, según nuestra experiencia, son de muy positiva influencia las restricciones del ámbito de búsqueda a entidades territoriales más pequeñas. Estos pasos facilitarían trabajar en la creación de un código numérico que sustituya al código único arbitrario que venimos utilizando hasta ahora. Se trataría de un código similar, en parte, al código INE actual, en lo que se tiene que ver a que estaría compuesto de dos partes, una provincial y otra de localidad. La primera se obtendría a partir de la ordenación alfabética de los nombres de las provincias antiguas, resultando en un número ordenado de provincia en dos cifras. La segunda parte, correspondería a un código numérico de nombre de localidad generado a partir de la conversión en cifras de sus nombres normalizados. Esta conversión ha de ser reflexionada para convenir cuantas cifras debería tener como máximo, cómo manejar los nombres iguales y los nombres homófonos, entre otras cuestiones.

Otra cuestión clave para validar las equivalencias entre fuentes está en determinar el concepto de localidad. Las diferencias entre Floridablanca y Ensenada precisamente han venido determinadas por esta cuestión. La magna averiguación catastral toma como punto de referencia cualquier ubicación que contara con alcabalatorio independiente. En la práctica esto suponía, para el espacio de estudio, la comarca de Ciudad Rodrigo, que muchas dehesas sin vecindad ninguna se recogieran como despoblados. Un concepto que no es el mismo dentro de Floridablanca. En pasos futuros se seguirá ahondando en el criterio territorial a través del análisis documental de otras zonas en las que estaría Aragón, con la Única Contribución, o Cataluña con el Catastro de Patiño (Camarero et al, 2006).

Otros pasos, y ya iniciados, van enfocados a mejorar el desarrollo de estándares propios que faciliten el intercambio de información creando poco a poco una gran IDE temática. No centramos por tanto el foco solo en la visualización sino en la gestión de los datos desde una perspectiva global sin centrarnos en aspectos temáticos concretos. Las mejoras también tendrán que venir dadas por búsqueda de procesos más automáticos en la localización de topónimos, siendo esta la mejor vía para poder reconstruir una base administrativa histórica que facilite la comprensión de los cambios en el territorio. Con las conclusiones extraídas el modelo de datos creado debe alinearse lo máximo posible con estándares actuales centrados en nombres geográficos siguiendo las especificaciones de la directiva INSPIRE o de la norma UNE-EN ISO 19112 para sistema de referencia espaciales por identificadores geográficos.

Finalmente, el último paso estaría en descender en la escala local, algo que ya se ha comenzado a probar a través del empleo de la parcela catastral como gran eje vertebrador.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto de Investigación I+D+i PID2019-106735GB-C21 del Ministerio de Ciencia e Innovación, titulado: Avanzando en el conocimiento del Catastro de Ensenada y otras fuentes catastrales: nuevas perspectivas basadas en la complementariedad, la modelización y la innovación, subproyecto del proyecto coordinado: Las fuentes geohistóricas, elemento para el conocimiento continuo del territorio: retos y posibilidades de futuro a través de su complementariedad (FGECCT) y en el del Proyecto FUAM-465026 de Transferencia del Conocimiento de la Fundación de la Universidad Autónoma de Madrid y la Dirección General del Catastro de España. Nuevos métodos y enfoques para la transferencia en ciencias sociales y humanidades en materia catastral: una historia que merece ser contada.

4. BIBLIOGRAFÍA

Almonacid Ramiro, C. (2019). Georreferenciación de cartografía antigua para la web del Servicio de Cartografía de la Universidad Autónoma de Madrid. *CT Catastro*, 97, 115-130.

Batista da Costa, E., y Sodré Maluly, V. (2021). Geografía histórica y tiempo geográfico, concepto y superación de dicotomías. *Revista de Geografía Norte Grande*, 79, 253-277.

Camarero Bullón, C. (2002). El Catastro de Ensenada, 1745-1756: diez años de intenso trabajo y 80.000 volúmenes manuscritos. *CT Catastro,* 46, 61-88.

Camarero Bullón, C. y Faci Lacasta, P. (2006). La estructura documental del Catastro de Patiño, según las Reglas Anexas al Real Decreto de 9 de diciembre de 1715. *CT: Catastro*, 56, 89-116.

Capdevila, J., y Bonilla, R. (2009). Cartographic patrimony in the Spanish SDI. The cadastral series of nineteenth century: Hojas kilométricas (Kilometric Sheets). *e-Perimetron*, 4(1), 38-44.

Cascón-Katchadourian, J., López-Herrera, A. G., Ruiz-Rodríguez, A. Á., y Herrera-Viedma, E. (2019). Proyecto Histocarto: aplicación de SIGs (georreferenciación y geolocalización) para mejorar la recuperación de la

documentación histórica gráfica. *Profesional de la Información*, 28(4).

Díaz López, J. P. (2012). Entre la descripción y la metodología novedosa: medio siglo en la historiografía del Catastro de Ensenada. *Nimbus: Revista de climatología, meteorología y paisaje*, 29, 201-216.

Esteban Rodríguez, E. (2021). La toponimia de viñedo en España: un elemento fundamental para la reconstrucción histórica de la geografía del cultivo. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 88.

García Juan, L., Aguilar Cuesta, Á. I., y Vallina Rodríguez, A (2018). ¿Hacia una IDE para fuentes geohistóricas? *Mapping*,191, 38-47.

García Juan, L., Miguel, Á. J., Camarero Bullón, C., y Escalona Monge, J. (2011). Modelo de datos para la digitalización y gestión de fuentes Catastrales Geohistóricas Textuales: Aplicación al Catastro de ensenada. *CT Catastro*, 72, 73-98.

García Juan, L., y Vallina Rodríguez, A. (2019). SIG y bases de datos: Oportunidades y retos en la transición de los sistemas tradicionales al Big Data. *Espacio, Tiempo y Forma*.

Esteban Rodríguez, S. (2021). La toponimia de viñedo en España: un elemento fundamental para la reconstrucción histórica de la geografía del cultivo. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (88).

Ingelmo Casado, R. (2012). Georreferenciación de documentación histórica mediante la toponimia de los catastros. GeoFocus. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 12, 243-267.

Kadochnikov, A., Shaparev, N., Tokarev, A., y Yakubailik, O. (2019). Software tools for web mapping systems. *OP Conference Series: Materials Science and Engineering*.

Mastral Gascón de Gotor, M. (2013). Geodara y la lista de localidades y divisiones administrativas de Aragón: dos herramientas eficaces para el control de la información geográfica. *Scire: representación y organización del conocimiento*, 57-62.

Sánchez Domingo, R. (1996). La intendencia de Burgos en el siglo XVIII. *Boletín de la Institución Fernán González*, 212, 149-168.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 163-172

23.456.248.059.221 mapas ¿realidad o ilusión?

G. López García[1], A. García de Vicuña Ruiz de Argandoña[1], P. Martínez Pérez[2]

[1] Sección de Datos Geográficos y Cartografía, Gobierno de La Rioja. C. Marqués de Murrieta 76, 26005 Logroño.
[2] Dirección General para el Avance Digital, Gobierno de La Rioja. C. Piqueras 98, 26006 Logroño.

glopez@larioja.org, agvicuna@larioja.org, pmperez@larioja.org

RESUMEN: La irrupción de Internet y muy especialmente el uso de los dispositivos móviles ha modificado radicalmente el modo de consultar los mapas. Google ha demostrado que un mapa no tiene por qué ajustarse a una escala específica y ni tan siquiera a un entorno concreto, y que basta un teléfono para moverse por todo el globo con el máximo nivel de detalle. El mapa ha pasado a manejarse como una pirámide de imágenes digitales superpuestas diseñadas para todos los niveles de escala posibles, siendo el dispositivo el que elige qué consultar. Para hacerlo efectivo se parte de una pequeña imagen de 256x256 píxeles en la que se representa todo el mundo (nivel 0), a partir de la cual se generan 4 imágenes duplicando la escala de representación, reiterando el proceso siguiendo una estructura de quadtree hasta alcanzar el nivel máximo de detalle que se quiere ofrecer.
Construir un fondo cartográfico global de estas características hasta una escala aproximada 1:130 (nivel 22) requeriría renderizar potencialmente 23.456.248.059.221 teselas, algo que en principio escapa a las posibilidades técnicas de casi cualquier administración.
Se describen a continuación los procesos técnicos que se han diseñado desde IDErioja que han permitido poder ofrecer un servicio XYZ de teselas ráster de carácter global, en el que se yuxtapone la información geográfica oficial con datos cartográficos colaborativos.

Palabras-clave: Teselas ráster, teselas vectoriales, servicio XYZ, estructura quadtree.

1. INTRODUCCIÓN

Hasta hace no muchos años los usuarios de cartografía estábamos muy familiarizados con los mapas en papel en los que se representaba una parte del territorio a una escala determinada, siendo preciso encontrar entre los mapas publicados el que más se ajustaba a cada necesidad.

La irrupción de Internet y muy especialmente el uso de los dispositivos móviles ha modificado radicalmente el modo de consultar los mapas. Pasada una primera fase en la que la consulta online de mapas se apoyaba en versiones digitalizadas de los documentos en papel, la interactividad se fue imponiendo y con ella la forma de acceder y manejar los mapas. En este sentido fue crucial la influencia que ejerció Google Maps, ya que rápidamente nos mostró que un mapa no tenía por qué ajustarse únicamente a una escala específica y ni tan siquiera a un entorno concreto, y que bastaba un teléfono para moverse por todo el mundo con el máximo nivel detalle. A partir de entonces parece imprescindible que cualquier cartografía de referencia que se precie cumpla estos tres principios.

Para que un usuario pueda ubicarse en cualquier punto de la tierra a cualquier escala, el mapa ha pasado a convertirse en una pirámide de imágenes digitales superpuestas, generadas para todos los niveles de escala posibles, siendo el dispositivo el que elige en cada caso concreto la imagen a consultar. La construcción de esta pirámide de mapas parte de una pequeña imagen de 256x256 píxeles en la que se representa todo el mundo. A partir de esta imagen inicial o nivel cero, se generan 4 imágenes también de 256x256 píxeles duplicando la escala de representación, conformando estas 4 imágenes el nivel uno de la pirámide.

El proceso se repite iterativamente cuadriplicando en cada nivel el número de imágenes del nivel anterior, siguiendo una estructura denominada quadtree hasta el nivel máximo de detalle que se quiere ofrecer.

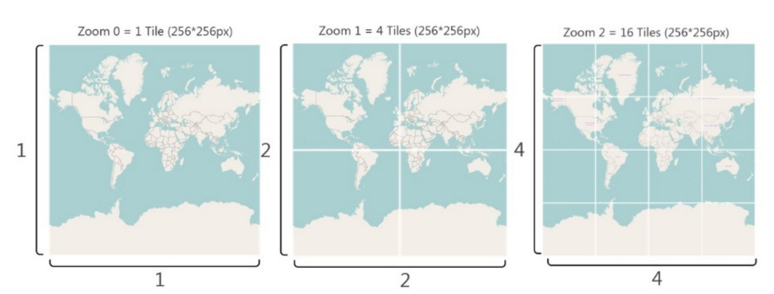


Figura 1. Proceso de generación de teselas por subdivisión quadtree

Una operación sumatoria de las potencias de cuatro permite realizar un cálculo rápido de las teselas o micromapas que son necesarios para atender un servicio basado en esta tecnología denominada servicios XYZ de teselas. Para que un usuario de este servicio pueda seleccionar las teselas que necesita para componer su fondo cartográfico hasta un nivel de escala aproximada 1:130, equivalente al nivel 22 del quadtree, sería necesario disponer potencialmente de 23.456.248.059.221 de teselas prerrenderizadas para todo el mundo, algo que en principio escapa a las posibilidades técnicas de casi cualquier productor.

En IDErioja, después de una experiencia inicial de producción de teselas ráster para crear un mapa base en el ámbito de Comunidad Autónoma de La Rioja, estudiamos la posibilidad de hacerlo global, completando la información geográfica oficial más allá de los límites de nuestra comunidad autónoma a partir de los datos de OpenStreetMap, intentado ofrecer una yuxtaposición de información geográfica oficial y datos geográficos colaborativos hasta un nivel de escala local.

Hasta la fecha no existe en España una iniciativa similar de servicio global, ni donde se compagine información geográfica oficial con la proveniente de bases de datos colaborativas. En este sentido los servicios más parecidos al ofrecido por IDErioja, son los que se derivan de soluciones de imágenes ráster cacheadas distribuidas a través de servicios Web Map Tile Server (WMTS), con un alcance limitado.

2. METODOLOGÍA

La experiencia inicial de generación de teselas ráster a partir de ficheros de geodatos, para el ámbito geográfico de la Comunidad Autónoma de La Rioja, confirmó que el prerrenderizado manual de las teselas de imagen resultaba extraordinariamente costoso tanto en tiempos de producción como en recursos consumidos.

Por otra parte, la actualización de un mapa base de estas características resulta técnicamente complicado ya que la alteración de cualquiera de los elementos geográficos representados implica la detección y el renderizado de nuevo de todas las teselas afectadas para los distintos niveles de detalle en los que se encuentra representado el elemento geográfico alterado.

Siendo por tanto inviable bajo estas premisas el proceso de renderizado convencional, se reformuló la metodología a utilizar en los siguientes términos:

- Renderizado de imagen al vuelo, a demanda del usuario

  Con objeto de evitar la necesidad de tener pregenerada una base de datos de teselas de imagen, se propone la posibilidad de automatizar un proceso de renderizado al vuelo de una tesela de imagen en el momento en el que dicha tesela sea solicitada por un usuario.

- Generación de teselas vectoriales

  En lugar de renderizar la tesela imagen a partir de ficheros de geodatos, se comprobó que el proceso de simbolización resultaba más eficaz si los elementos a representar provenían de una tesela vectorial diseñada para el mismo ámbito geográfico y nivel de detalle. De esta manera la actualización de un elemento geográfico se realiza únicamente en el fichero o base de datos espacial a partir de la cual se generan las teselas vectoriales, siendo el proceso de actualización de las teselas vectoriales mucho más sencillo de automatizar.

- Automatización de todos los procesos mediante programación

  Para minimizar la dedicación de recursos aplicados a la actualización de información, producción de teselas vectoriales, renderizado de teselas ráster y su distribución es imprescindible que todos los procesos puedan ser programados y se ejecuten de forma automática.

- Utilización de software libre

  Con objeto de que el proyecto sea económicamente viable y pueda ser reproducido por cualquier otro productor de cartografía, se ha utilizado con carácter general software libre en todas las fases del trabajo, exceptuando algún proceso puntual de preprocesado de información que se ha realizado con el software ETL FME.

3. DATOS

La viabilidad técnica de poder producir una tesela de imagen a demanda de un usuario en cualquier parte del mundo para distintos niveles de detalle, ofrece la posibilidad de extender el ámbito geográfico de actuación desde un nivel regional hasta un nivel global, manteniendo la obligada continuidad cartográfica. Esto ofrece la ventaja de que el mapa base se puede utilizar en cualquier tipo de aplicación sin restricciones territoriales.

La información geográfica que utiliza el mapa base proviene de dos fuentes de datos:

- Datos geográficos del Gobierno de La Rioja

  Dentro del ámbito geográfico de la Comunidad Autónoma de La Rioja los datos cartográficos representados provienen de las bases de datos espaciales y cartografía oficial del Gobierno de la Rioja. A partir de estas fuentes de datos se define un modelo de datos vectoriales: geometrías, atributos y dominios de valores diseñado específicamente para ser representado conforme al proyecto visual elegido para el mapa base.

  En un primer momento y a falta de un modelo normalizado, se construyó un modelo de datos específico con este propósito.

  A partir de los trabajos de la Comisión Especializada de Normas Geográficas del Consejo Superior Geográfico para la producción de un mapa base nacional con teselas vectoriales en el marco del Sistema Cartográfico Nacional (https://ideespain.github.io/mapabase/), se ha rediseñado el modelo de datos de las teselas vectoriales para que fuera conforme con el propuesto a nivel nacional.

  Este modelo consta de 68 tipos de objetos geográficos (puntos, líneas y polígonos) cuya definición completa se puede consultar en la siguiente url: https://ideespain.github.io/mapabase/elementos/relacion_alfabetica/



Relación alfabética de elementos geográficos

El cuadro siguiente muestra los elementos geográficos que conforman el mapa base, en qué niveles de zoom participan de forma total (x), o parcial (p) en función del valor de uno o varios de sus atributos, y el área temática a la que están asociados.

Elemento geográfico	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
aerodromo_pol													x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
aerodromo_pto											x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
altimetria_lin														p	p	p	x	x	x	x	x	x	x
altimetria_pto																		x	x	x	x	x	x
aparcamiento_pol															x	x	x	x	x	x	x	x	x
aparcamiento_pto														x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
area_servicio_pol															x	x	x	x	x	x	x	x	x

Figura 2. Elementos geográficos que componen las teselas vectoriales

La definición incluye también la intervención de cada uno de estos elementos en función del valor de sus atributos para cada uno de los 23 niveles de detalle de las teselas vectoriales definidas desde una escala global 1:559M (nivel 0) hasta una escala local 1:133 (nivel 22).



Figura 3. Ejemplo de composición de la tesela vectorial de nivel 14

- Datos geográficos fuera de los límites de la Comunidad Autónoma de La Rioja

  Con objeto de completar el mapa base globalmente más allá de los límites geográficos de la Comunidad Autónoma de La Rioja, se ha utilizado la información geográfica contenida en la base de datos OpenStreetMap (OSM), dado que su utilización es de uso libre y el modelo de datos es idéntico para cualquier lugar del mundo.

  Entre las distintas fórmulas que permiten acceder a la información de OSM, se ha optado por la descarga del fichero Planet OSM (https://planet.openstreetmap.org/), ya que dicha información se ofrece de forma completa con un periodo de actualización semanal, y además de los elementos geométricos y sus duplas de atributos, incorpora las relaciones que vinculan a los distintos elementos lo que permite reconstruir elementos geográficos de orden superior.

  La información batimétrica no contenida en la base de datos OSM, se obtiene a partir de los datos ofrecidos bajo licencia de uso de dominio público por Natural Earth (https://www.naturalearthdata.com)

  La información para la representación de los biomas que se utilizan como información de referencia en las pequeñas escalas del mapa, se extrae de los datos de ecorregiones terrestres ofrecidos por la Unión Europea (https://dopa.jrc.ec.europa.eu/dopa/data-and-maps/).

  A partir de la información de todas estas fuentes externas de geodatos ha sido necesario de-finir un modelo que permitiera una simbolización homogénea con la definida en el ámbito regional de La Rioja. Siendo imposible de definir un modelo de datos idéntico dado que los atributos asociados a los distintos objetos geográficos distan mucho entre sí, se ha definido uno tal que permitiera la continuidad cartográfica en la zona de contacto entre ambos modelos.

4. MÉTODOS

La secuencia de procesos que permiten llegar desde la descarga de los datos geográficos hasta la distribución de las teselas ráster que conforman el mapa es ciertamente compleja especialmente en lo relativo a la información externa a La Rioja, pudiéndose agrupar las tareas en dos partes muy diferenciadas: descarga, preprocesado de datos y producción de teselas vectoriales; y renderizado y distribución de teselas ráster.

4.1. Descarga, preprocesado de datos y producción de teselas vectoriales

La generación de teselas vectoriales se realiza con el software libre Tippecanoe (https://github.com/mapbox/tippecanoe). Este software permite la creación de teselas vectoriales a partir de los formatos de entrada GeoJSON (http://geojson.org/) y Geobuf (https://github.com/mapbox/geobuf) entre otros, por lo que la primera fase del proceso consiste en la extracción de los elementos geográficos que van a conformar las teselas vectoriales y su almacenamiento en formato GeoJSON.

Distintas pruebas realizadas confirman la mejora de la eficiencia de los procesos cuando se maneja la

información a partir de un formato GeoJSONSeq (https://gdal.org/drivers/vector/geojsonseq.html). La diferencia entre un formato GeoJSON convencional y un GeoJSONSeq es que en este último las entidades geográficas están internamente codificadas como objetos GeoJSON, estando separados entre ellos por un retorno de línea (LF). Este pequeño detalle técnico recorta muy significativamente los tiempos de procesado.

Otra de las estrategias que optimiza el rendimiento del procesado es el almacenamiento de los ficheros de datos en formato Geobuf (https://github.com/mapbox/geobuf). Este formato comprime los ficheros GeoJSONSeq mediante Protocol Buffers para ofrecer una salida optimizada y de menor tamaño.

Para la creación de los tiles vectoriales con cobertura global, se ha creado un script en Python que automatiza todas las tareas. Dicho script ejecuta los siguientes pasos, basándose en un fichero de configuración:

- Descarga del fichero Planet de OpenStreetMap (OSM)

  El fichero Planet de OSM se puede descargar desde la url: https://planet.osm.org/pbf/planet-latest.osm.pbf

  En el script Phyton de creación de las teselas vectoriales existe un parámetro de configuración "download_planet" que permite definir si dentro del proceso se descarga o no la base de datos OSM. Cuando dicho parámetro se configura como "yes" la ejecución del proceso incluye la descarga del fichero Planet de OSM en formato PBF (Protocol Buffers), cuya ocupación es aproximadamente de 41 GB.

- Extracción de las capas base primarias OSM

  Las capas primarias de OSM se extraen utilizando el comando 'osmium tags-filter' de: https://github.com/osmcode/osmium-tool, en formato PBF.

  El proceso lee el fichero Planet en formato PBF y por cada capa definida en un parámetro denominado "osm_tags" genera una capa primaria en formato PBF dentro de una carpeta denominada «layers-json/pbf».

  Ejemplo de configuración:

```
"osm_tags": [
  {
   "key": "admin_level",           --> Clave a buscar en el fichero Planet
   "name": "admin_level",          --> Nombre del fichero de salida
   "extract": "yes",               --> Flag para procesar capa (yes/no)
   "description": "admin_level"    --> Mensaje para el log
  },
  {
   "key": "amenity",
   "name": "amenity",
   "extract": "no",
   "description": "amenity"
  }
]
```

  En la configuración del proceso de creación de VT, se activa: "extract_layers": "yes"

- Filtrado de capas primarias OSM

  A partir de los ficheros PBF de las capas principales, se realiza un segundo filtrado, discriminando por determinados atributos las capas finales que se quieren obtener. Para realizar este filtrado se utiliza el comando 'osmium tags-filter' y el bloque "filter" de nuestro fichero de configuración.

  Ejemplo de filtrado:

```
"filter": [
  {
   "layer": "admin_level.pbf",                          --> Capa de entrada
   "layer_filtered": "filtered_admin_level_2.pbf",      --> Capa de salida
   "process": "yes",                                    --> Procesar capa (yes/no)
   "condition": "admin_level='2'"                       --> Filtro
  },
```

```
        {
         "layer": "admin_level.pbf",
         "layer_filtered": "filtered_admin_level_4.pbf",
         "process": "yes",
         "condition": "admin_level='4'"
        }
      ]
```

El resultado de este filtrado es un fichero PBF que cumple las condiciones del filtro, teniendo en cuenta que se almacenan también todas las relaciones de los elementos filtrados.

En la configuración del proceso de creación de VT, es necesario activar: "filter_layers": "yes"

- Exportación de capas filtradas

  La exportación de las capas filtradas se realiza con el comando 'osmium export' a formato NDJson (Newline Delimited JSON) para aprovechar las capacidades de multiproceso de Tippecanoe.

  Se configura osmium export para que conserve solamente los campos que se necesitan.

  Dado que las capas filtradas contienen los elementos junto con sus relaciones, es necesario tener estas en cuenta para generar un fichero de exportación que cumpla los requisitos de filtrado. Esto se realiza con el comando GREP de linux de la siguiente forma:

```
# osmium export -r filtered_water_lake.pbf -f geojsonseq -u counter -o filtered_water_lake.ndjson
# cat filtered_water_lake.ndjson  | grep '"water":"lake"' | grep 'Polygon' > lake-polygon.json
```

  De esta manera, en el ejemplo quedaría un NDJson que contiene los polígonos "water":"lake".

  Existen determinadas 'super-relaciones' de OSM que no permiten la extracción correcta de sus geometrías (ej. Grandes Lagos de Water-Lake, por lo que este filtrado ha sido eliminado de la configuración ya que daba como resultados capas incompletas.

  Por este motivo en determinadas capas donde existen superrelaciones de OSM, como por ejemplo en 'water-lake', alternativamente se puede ejecutar un comando de GDAL para obtener las geometrías partiendo del fichero PBF generado con 'osmium tags-filter'.

  Ejemplo de comando:

```
ogr2ogr -f "GeoJSON" -sql "select * from multipolygons where water='lake'" filtered_water_lake.geojson filtered_water_lake.pbf --config ogr_interleaved_reading yes
```

  El resultado del filtrado de capas, se convierte a GeoJSON-Seq con el comando 'osmium-export' y si fuera posible a Geobuf.

- Descarga de los polígonos de tierra firme

  La capa de tierra firme es una de las capas más difíciles de generar, debido a la multitud de vértices, la exigente topología y su dimensión. Por este motivo se ha descartado su descarga y reconstrucción por el procedimiento convencional que se sigue para el resto de las capas base primarias.

  También se ha descartado la extracción de los polígonos de tierra firme que se realiza a partir del fichero Planet de OSM mediante la herramienta OSMCoastline: https://github.com/osmcode/osmcoastline, ya que en algunos casos la capa creada es fallida. Esta herramienta extrae los polígonos y los almacena en una base de datos SQLite, a partir del cual mediante la herramienta GDAL, OGR2OGR se convierte a formato GeoJSON.

  La alternativa consiste en descargar la capa de polígonos de tierra firme directamente de la url http://openstreetmapdata.com/data/land-polygons. Una vez descargados en formato Shapefile, se descomprimen y convierten a GeoJSONSeq almacenándose en la capeta «layers-json».

  Este procedimiento se activa en la ejecución del script mediante el parámetro"download_land": "yes".

- Extracción de las capas base primarias del Gobierno de La Rioja

  Una vez se han extraído las capas primarias de OSM y convertido a formato GeoJSONSeq comprimido a GeoBuf se encadenan una secuencia de comandos para la extracción de las capas de objetos geográficos

conformes con el modelo definido por el Sistema Cartográfico Nacional. La extracción se realiza a partir de la base de datos espacial del Gobierno de La Rioja y del mismo modo que se hace con la información de OSM, los elementos geográficos se almacenan los ficheros GeoJSONSeq en formato PBF.

- Tileado vectorial

  El tileado vectorial es la fase final del procesado automático. Este se realiza con el software *Tippecanoe* de MapBox: https://github.com/mapbox/tippecanoe

  Se realiza un tileado por cada capa y por cada nivel de zoom, de esta manera se puede configurar correctamente cada una de las capas con los elementos que se quieren distribuir.

  Mediante la herramienta Tile-Join se genera la tesela vectorial completa con el conjunto de capas de información por cada nivel de zoom. La configuración del script determina la naturaleza y propiedades de los elementos que componen cada tesela vectorial.

  Las teselas vectoriales son almacenadas en tres colecciones diferentes: capas OSM, edificaciones OSM y capas Gobierno de La Rioja, generando un fichero MBTiles por cada colección y nivel de detalle, llegando el procesado hasta el nivel 14 de detalle o zoom para la colección de capas OSM y edificaciones y nivel 18 para la colección de capas del Gobierno de La Rioja.

- Simplificación geométrica de elementos en las teselas vectoriales

  Para que la visualización de los mapas sea rápida y fluida para los usuarios finales, el tamaño máximo recomendable para una tesela vectorial es de 500kb en cualquier nivel de zoom. Por ello hay que definir la cantidad de datos que pueden existir en una sola tesela vectorial para ajustarnos a ese límite. En función del nivel de zoom en el que nos encontramos se especifica el conjunto de elementos a incluir en la tesela vectorial.

  Es por ello, que todas las capas de información se organizan por niveles de zoom. En los niveles de zoom más lejanos (ejemplo: nivel 0) se incluye un conjunto mínimo de capas, mientras que en los niveles de zoom más cercanos (ejemplo: nivel 18) se incluyen todas las capas de información a representar.

  En el proceso de generación de teselas vectoriales también se pueden simplificar las características geométricas de los elementos de manera que su tamaño esté por debajo de este límite superior y se muestre correctamente en los mapas.

4.2. Renderizado y distribución de teselas imagen (ráster)

El renderizado y visualización de teselas vectoriales con un estilo determinado se realiza al vuelo y para ello se utiliza la librería Node.js de *Mapnik*.

La librería *Mapnik* permite definir una propuesta de estilizado mediante la configuración de un archivo XML en el que se establece cual va a ser la representación de los elementos geográficos vectoriales, etiquetados textuales y simbolización iconográfica de elementos y rótulos. Todo ello se define para los elementos contenidos en las teselas vectoriales en función del nivel de zoom en el que se representan. El renderizado de teselas vectoriales se emplea para generar las teselas ráster que conforman el *Mapa Base de La Rioja*.

- Aspectos generales

  En una primera fase de la renderización al vuelo se definen los dos servicios de teselas vectoriales que se van a combinar: Teselas Rioja y Teselas OSM, con objeto de constituir la tesela ráster final para cada uno de los niveles de zoom. De esta manera las teselas ráster estarán conformadas con los elementos geográficos que aparecen en ambas colecciones o sólo con los elementos de una de las dos colecciones. Por ejemplo, las teselas vectoriales de las zonas limítrofes de La Rioja incluirán información de ambas colecciones. Todo ello se realiza mediante un fichero de configuración que interpretará el programa de renderizado.

  En una segunda fase de la renderización, se generan diferentes propuestas de estilizado (archivos XML) para cada uno de los niveles de resolución (0 a 22) de los elementos incluidos tanto en la colección de teselas vectoriales de La Rioja como de las teselas vectoriales de OSM. Es en estos archivos dónde se define la representación y el estilizado cartográfico de los elementos: tramas, color, simbolización y rotulación adecuados, así como la prioridad y orden de los elementos a representar.

  En la zona de La Rioja se dispone de información de OSM y de información oficial de La Rioja que se simboliza de la misma manera. Las capas de mayor prioridad corresponden a la colección de La Rioja y las de menos prioridad a la de OSM. Existe una capa de tierra firme en La Rioja que oculta las capas de OSM

y que permite que los elementos no aparezcan superpuestos. Este proceso de combinación de información no ralentiza la carga de la tesela vectorial y tampoco la renderización del mismo, pero sí evita que se tengan que diseñar procesos costosos de recorte de la información que proviene de OSM. De esta manera es posible mantener actualizada la información de OSM con la descarga completa y periódica del archivo *Planet* de OSM.

- Overzoom

  La técnica *overzoom* permite que una tesela se represente más allá del nivel de zoom previsto, de manera que los elementos incluidos en la tesela siguen siendo visibles en el mapa cuando se realizan ampliaciones más allá del nivel de zoom máximo para el que se han generado las teselas vectoriales, el renderizador del mapa sigue empleando los elementos geográficos de ese nivel de zoom máximo.

  Se utiliza la metodología de overzoom con objeto de no tener que generar teselas vectoriales en los niveles de zoom de mayor detalle y de disponer de una colección de teselas que se amplía más allá de su extensión de zoom determinada, lo que permite un ahorro de tiempo en la generación de teselas en los niveles de mayor escala, así como un ahorro de espacio de almacenamiento.

  Es posible aplicar esta técnica dado que las teselas vectoriales no pierden información cuando se aplica el overzoom para generar las teselas ráster en los niveles de zoom de mayor detalle, pudiendo simbolizar así todo el detalle geométrico de los elementos geográficos sin ningún tipo de simplificación.

  Las teselas vectoriales correspondientes a la cartografía oficial del Gobierno de La Rioja se generan hasta un nivel de zoom 18, pudiéndose renderizar hasta un nivel de zoom 22, esto es, se emplea el detalle geométrico de los elementos del nivel 18 y se visualizan hasta un nivel 22. Para la colección de teselas vectoriales de OpenStreetMap (OSM) se generan a un nivel 14 de detalle.

- Simplificación geométrica de elementos en las teselas vectoriales

  Para que la visualización de los mapas sea rápida y fluida para los usuarios finales el tamaño máximo recomendable para una tesela vectorial es de 500kb en cualquier nivel de zoom. Por ello hay que definir la cantidad de datos que pueden existir en una sola tesela vectorial para ajustarnos a ese límite. En función del nivel de zoom en el que nos encontramos se especifica el conjunto de elementos a incluir en la tesela vectorial.

  Es por ello, que todas las capas de información se organizan por niveles de zoom. En los niveles de zoom más lejanos (ejemplo: nivel 0) se incluye un conjunto mínimo de capas mientras que en los niveles de zoom más cercanos (ejemplo: nivel 18) se incluyen todas las capas de información a representar.

  En el proceso de generación de teselas vectoriales también se pueden simplificar las características geométricas de los elementos de manera que su tamaño esté por debajo de este límite superior y se muestre correctamente en los mapas.

- Rotulación y recombinación de las teselas ráster

  La continuidad en la rotulación de los textos es uno de las cuestiones técnicas más complejas de resolver, ya que los elementos textuales generalmente se extienden mucho más allá que el límite geográfico de una tesela, siendo preciso mantener en cualquier caso la continuidad visual de los textos.

  Para lograr que los textos no se queden cortados y sin continuidad en el límite de la tesela que se está representando, el proceso de producción de textos se realiza de forma paralela externamente al proceso de renderizado de los elementos geométricos. Para conseguir la continuidad de los textos, estos se renderizan para un tamaño de tesela de 512x512 píxeles mayor que el tamaño convencional de la tesela ráster que se sirve que es de 256x256 píxeles.

  Una vez generados los textos, las teselas imagen que se han generado se recortan al tamaño de 256x256 píxeles y se recombinan con la tesela de estilizado de los objetos geográficos.

  Este proceso de unión de imágenes tiene utilidad para integrar en la imagen final además de textos otro tipo de capas ráster como por ejemplo los modelos de sombreado geomorfológico.

  La recombinación final de las imágenes generadas da como resultado la tesela ráster a distribuir por el servicio.

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La metodología desarrollada permite ofrecer un servicio actualizado de distribución de fondos cartográficos con un rango de escalas muy amplio, desde una escala global hasta un nivel de detalle local, sin la necesidad de tener que pregenerar los más de 23 billones de imágenes que componen todos los mapas posibles.

Las soluciones descritas ofrecen la posibilidad de yuxtaponer y combinar datos geográficos procedentes de distintas fuentes, integrados en una oferta cartográfica única.

Todas las operaciones descritas se materializan en el servicio XYZ global de teselas ráster que el Gobierno de La Rioja ofrece con carácter público a través de su departamento de Sistemas de Información Geográfica en la url: https://rts.larioja.org/mapa-base/rioja/{z}/{x}/{y}.png

Este servicio es de un consumo muy sencillo y compatible con todo tipo de librerías, visualizadores geográficos, aplicaciones para dispositivos móviles y programas informáticos de sistemas de información geográfica, siendo su uso universal.

La disponibilidad de este servicio permite contar con independencia tecnológica en cuanto a la disponibilidad de fondos cartográficos de referencia, no comprometiendo los costes de uso y mantenimiento que supondría utilizar otras ofertas de carácter propietario existentes en el mercado.

Los resultados visuales se pueden consultar a través del visualizador que ofrece el Gobierno de La Rioja en la url: https://www.iderioja.larioja.org/vct/index.php?

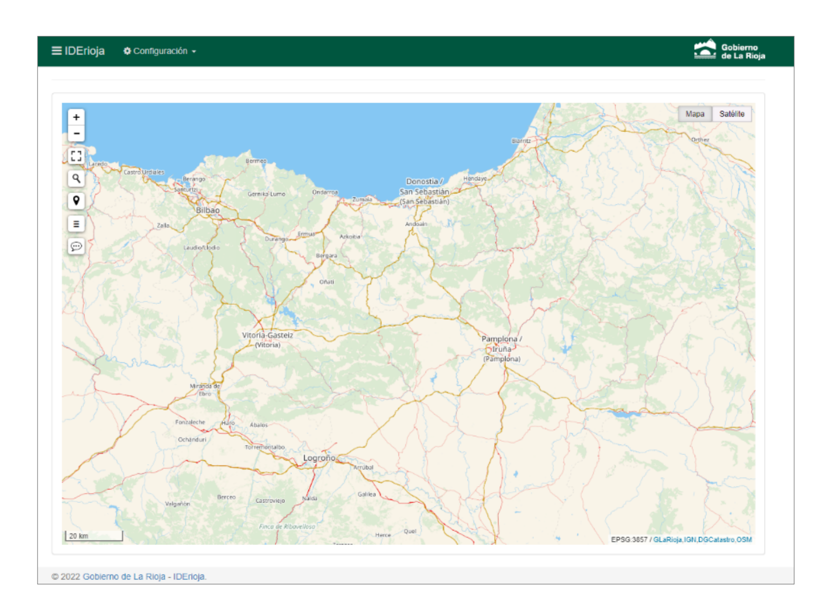


Figura 4. Visualización de teselas ráster del Mapa Base de La Rioja

La tecnología utilizada de renderización al vuelo de teselas vectoriales permite disponer de una manera sencilla de otras salidas cartográficas mediante la reconfiguración de los ficheros utilizados para el estilizado ráster.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este proyecto ha sido posible gracias a la existencia de un conjunto de librerías y aplicativos de software libre y datos geográficos de uso público.

Nuestro agradecimiento va dirigido a los editores de datos públicos y a los desarrolladores y empresas que han dedicado tiempo y recursos al desarrollo de estos datos y herramientas:

GDAL; Geobuf; GeoJSON; GeoJSONSeq; Linux; Mapnik; MBTiles; Natural Earth; Node.js; OGR2OGR; OpenStreetMap; Osmium; Proj4js; Protocol Buffers; Python; SQLite; Tile-Join; Tippecanoe.

6. BIBLIOGRAFÍA

mapbox (fecha no señalada). Vector tiles standards. Extraído el 20 de junio de 2022. https://docs.mapbox.com/data/tilesets/guides/vector-tiles-standards

mapbox (fecha no señalada). Tippecanoe. Extraído el 20 de junio de 2022. https://github.com/mapbox/tippecanoe

mapnik (2018). Mapnik configuration XML. https://github.com/mapnik/mapnik/wiki/XMLConfigReference

Google (fecha no señalada) Protocol Buffers. Extraído el 20 de junio de 2022. https://developers.google.com/protocol-buffers



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 173-182

Atesoramientos y demografía, nuevas realidades en la Hispania imperial

D. Martínez Chico[1], A. Diez Castillo[2]

[1] Contratado postdoctoral 'Margarita Salas'. Grup de Recerca en Arqueologia del Mediterrani (GRAM). Departament de Prehistòria, Arqueologia i Història Antiga. Facultat de Geografia i Història, Universitat de València.
[2] Profesor contratado doctor. Grup de Recerca en Arqueologia del Mediterrani (GRAM). Departament de Prehistòria, Arqueologia i Història Antiga. Facultat de Geografia i Història, Universitat de València.

david.martinez-chico@uv.es, agustin.diez@uv.es

RESUMEN: Esta contribución explora los primeros planteamientos metodológicos de un proyecto arqueológico así como el potencial de los atesoramientos de monedas como fuente demográfica. Abordamos nuestra metodología tras trabajar con los datos en abierto del Coin Hoards of the Roman Empire Project (Oxford), proyecto con el que uno de nosotros (DMC) colabora como editor oficial de España y Portugal. Pretendemos analizar la extensión de las ciudades hispanas y sus fases de ocupación. Parece evidente que a mayor número de ciudades, mayor número de habitantes, al igual que a mayor tamaño de cada una de estas ciudades, mayor número de personas en cada una de ellas. Los datos con los que estamos trabajando en el programa R son el número de ciudades de Hispania, su extensión (ha) y los tesoros (apertura/cierre), ordenados cronológicamente por reinados o dinastías. Este proyecto utiliza datos abiertos para determinar si los acervos de monedas están *a priori* relacionados con la demografía. En el caso de Hispania, la mayoría de atesoramientos pertenecen a fechas tardías, concretamente del noroeste de Hispania (*Gallaecia*). Evidentemente, atesoramientos como el de Tomares (con más de 50.000 monedas) demuestran que todavía tenemos una visión muy parcial de la realidad. Por tanto, debemos fijarnos, por un lado, en el número de ciudades (y en esta fase, tímidamente, en las villas) y, por otro, en nuestros tesoros monetarios. El principal problema es que el tamaño de la ciudad debe decidirse cada 50 años a lo largo de seis siglos de presencia romana en época imperial.

Palabras-clave: tesoros, arqueología, demografía, ciudades romanas

1. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL

En una constante búsqueda de proxies y variables histórico-arqueológicas, susceptibles de estudiarse como fuentes demográficas, la historiografía de los últimos cincuenta años ha venido proponiendo distintas aproximaciones metodológicas. Como bien manifiestan Palmisano *et al*. (2017), en la última década hemos asistido a una renovación arqueológica, motivada por el interés cada vez más amplio en la reconstrucción demográfica. El papel del tamaño de una población como impulsor del cambio cultural fue quizás lo primero enfatizado por los antropólogos sociales (Naroll 1956; Carneiro 1962) y luego adoptado por los arqueólogos para explicar la variación a largo plazo en las formas de ocupación, claramente de subsistencia (Binford 1968; Sanders y Price 1968; Shennan 2000 y 2001). Y aunque muchas veces las investigaciones arqueológicas nacían tras el gran interés que supone el factor político en una sociedad (Feinman y Neitzel 1984; Feinman 2011), estudios recientes subrayan el impacto ascendente de las economías sobre las densidades de una población (Shennan y Edinborough 2007; Shennan 2009; Shennan *et al*. 2013), sobre todo a partir de niveles asociados a sociedades no sedentarias y activas en una misma región.

Tales discusiones alimentan el debate actual sobre si la innovación agrícola y la intensificación se desarrollan en respuesta a una población en crecimiento o viceversa. Otra aproximación que también se ha abordado en la demografía antigua es cómo el crecimiento de una población en un paisaje determinado ha ido típicamente a la par de modificaciones culturales cada vez más sustanciales. Por ejemplo, sabemos que a finales de la Edad de Hierro se asistió a un episodio de urbanización a gran escala, eclosionando un paisaje político fragmentado. En definitiva, la demografía y la posible cuantificación de una población han constituido un tema estrella en la investigación, no por ello menos problemática. Nuestro trabajo, sin embargo, centrará su atención en un periodo histórico, concretamente el romano imperial en Hispania, desde el reinado de Augusto al siglo VI d.C., bajo horizonte romano-visigodo y del que afortunadamente contamos

con más fuentes escritas y materiales. Teniendo en cuenta estos antecedentes, es evidente que una caracterización más diversa debe ser satisfactoria. Efectivamente las fluctuaciones demográficas en una población humana atienden a una serie de causas, muchas veces cíclicas a lo largo del tiempo. Entre la historiografía española (*vid*. estado de cuestión en Gozalbes Cravioto 2007), destaca el Prof. César Carreras Monfort (1996 y 2014; recientemente, Sinner y Carreras Monfort 2019), quien se basa en los tamaños (ha) de las ciudades hispanas. La extensión de las principales ciudades hispanas, pese a ser estimada y en constante actualización, se recoge en forma de listado por el propio Carreras Monfort. Sin embargo, existe un conocimiento deficitario. La extensión de la mayoría de las ciudades hispanas es desconocida. En cualquier caso, se trata del método más popular ya que nace de la extensión aproximada de los asentamientos, a veces coincidiendo con el perímetro de sus murallas. Solo hay que multiplicar la densidad por la hectárea conocida. No obstante, contamos con dos tipos de cálculo, atendiendo al tipo de asentamiento, si bien nosotros solo nos centraremos en las principales ciudades hispanas:

Urbano

Población = densidad de población por unidad **X** área ocupada del asentamiento.

Rural

Población = densidad del asentamiento por unidad **X** número de habitantes por asentamiento **X** superficie total del territorio ocupado.

Una fuente más clara puede encontrarse en las necrópolis y en la epigrafía. En este último caso, los estudiosos están de acuerdo en que los datos accesibles solo reflejan una parte de la población total, dependiendo de la riqueza material. Además, los monumentos epigráficos son un fenómeno centrado fundamentalmente en los siglos I-II d.C. En cuanto a las necrópolis, se entiende fácilmente que solo proporcionan un nivel parcial de información porque no han sido totalmente excavadas; el ritual de cremación de igual modo genera problemas. Además, hay muchas menos pruebas sobre la esperanza de vida o la tasa de mortalidad de las poblaciones del norte de Hispania. Además, algunas fórmulas intentan calcular las poblaciones combinando la información de los cementerios, las viviendas existentes en el yacimiento, las tasas de mortalidad y las pruebas al objeto de averiguar la edad del fallecido:

Fórmula 1 (Neustupny 1983)

Número de tumbas = Número de viviendas en el yacimiento X Tamaño medio de una familia X Tasa de mortalidad X Proporción de individuos por encima de una edad de referencia.

Fórmula 2 (Wells 1984)

Número de población = Número de tumbas X Esperanza de vida / Tiempo.

Por ejemplo, Fentress (2009: 144) utiliza los datos de su estudio de Yerba (Túnez) y también el de Etruria (Perkins 1999), para establecer las siguientes categorías, según las dimensiones de la dispersión:

Vicus grande – 80 personas (800 m^2) – 10 m^2 por persona

Villa grande – 50 personas (500 m^2) – 10 m^2 por persona

Vicus pequeño – 40 personas (400 m2) – 10 m^2 por persona

Villa pequeña – 30 personas (300 m^2) – 10 m^2 por persona

Granja grande – 10 personas (100 m^2) – 10 m^2 por persona

Granja pequeña – 5 personas (60 m^2) – 12 m^2 por persona

Pese a ello, Witcher (2005: 135) ya manifestó que el debate sobre el tamaño de una población, en el caso de la ciudad de Roma, continuaba, aunque el consenso actual se encuentra en 750.000 habitantes. *Grosso modo* el máximo pico llegaría en fechas altoimperiales. Determinar la demografía de la urbe imperial ha copado especial interés en la historiografía europea, ya que se pueden hacer analogías respecto a otras ciudades imperiales. Algunos historiadores sostienen con total razón que la demografía y su cuantificación no se tratan de numerolatría o fetichismo (González García 2015: 269), sino que el establecimiento de cifras absolutas y relativas es fundamental a la hora de poder analizar y comprender determinados pro-

cesos históricos.

La abundante e incesante bibliografía disponible sobre ello encuentra su súmmum en un novedoso trabajo realizado por Palmisano *et al*. (2017). Estos autores recientemente han estudiado las fluctuaciones demográficas de la Italia central, abarcando un amplio periodo comprendido entre el Mesolítico tardío y la caída del Imperio Romano (7500 a.C.-500 d.C.). Se basan en un extenso conjunto de datos arqueológicos del centro de Italia, como son 10.971 fases de ocupación, 7.383 yacimientos centroitalianos y 726 fechas de radiocarbono. El objetivo de su trabajo ha sido determinar las estimaciones de cambio en muchos yacimientos, que en el caso de los prehistóricos solo podían datarse con radiocarbono. La larga historia que existe en la Italia central a raíz de extensas excavaciones arqueológicas y proyectos de prospección sistemática hacen de esta región un estudio de caso inusualmente privilegiado para evaluar las tendencias demográficas. Los fértiles valles y las bajas colinas del centro de Italia, frecuentemente separados por una red de varios ríos que corren tanto en sentido este-oeste como en dirección norte-sur, proporcionó una zona adecuada para su asentamiento y el posterior poblamiento. Algo similar encontramos en la Bética (Valle del Guadalquivir), ampliamente conectada con la Península Itálica.

En el análisis efectuado por Palmisano *et al*. (2017: 68) se concluyó que en la Península Itálica las medidas mostraron un crecimiento demográfico gradual, que alcanzó un pico dramático durante la última Edad de Bronce y la temprana Edad de Hierro (1.200-900 a.C.). No obstante, la divergencia entre la suma del tamaño de los asentamientos y las demás medidas de asentamiento en este este último periodo se explica por los cambios radicales producido en los patrones de asentamiento durante la última Edad de Bronce (ca. 1175-1020/950 a.C.) y el comienzo de la Edad de Hierro (ca. 1020/950-750/25 a.C.). En este periodo se documenta el abandono de pequeñas aldeas (generalmente 2 y 3 ha), situadas en lugares abiertos o en pequeñas colinas. La ocupación de un número menor de sitios de mayor tamaño (50-100 ha), distribuidos por las tierras bajas y las mesetas, culminó en una urbanización a gran escala e inaugurando sociedades con estados durante el final de la Edad de Hierro (750/725-580 a.C.) y el periodo arcaico (580-480 a.C.). El paisaje político se fragmentó en varias ciudades-estado situadas a una distancia media de entre 15 y 25 km. Su espectacular crecimiento se produjo entre la última Edad del Bronce (1175-1020/950 a.C.) y la primera Edad del Hierro (1020/950-750 a.C.). Durante el periodo romano (500 a.C.-500 d.C.), la población itálica experimentó un gran auge, alcanzando un máximo en el periodo imperial temprano y medio (30 a.C.-150 d.C.). A partir de mediados del siglo II d.C., la población disminuyó gradualmente, en relación con una ola de epidemias (como la peste antonina) y una guerra civil endémica, alcanzando los niveles del periodo prerromano hasta finalmente la caída del Imperio Romano. Nos preguntamos si en la Península Ibérica existe una evolución y un patrón similares; y si fue así, en qué grado.

Otro tema a colación del marco histórico de la Península Ibérica, es la relación de las invasiones bárbaras con los tesoros monetarios, por haber estado impregnada de cierto sesgo historiográfico que merece la pena profundizar. Cualquier proyecto científico debe tener obligatoriamente una meta humana y social. La relación entre demografía, urbanismo, guerras, atesoramientos monetarios e inmigraciones puede ser extraña para una persona ajena a la ciencia histórica y social. Las conocidas como "invasiones bárbaras" en el Imperio Romano hoy día es un tema muy cuestionado, siendo el pretexto para explicar numerosos tesoros de Hispania y del centro de Europa. Un importante sector de la historiografía duda incluso del carácter violento que tuvieron, frente a las descripciones de los autores romanos, contaminadas por prejuicios de la época. El grado de violencia, durante la llamada *Pax Romana*, puede que fuera igual de violento, con la diferencia de que detrás no había un Estado. La dispersión geográfica de algunos tesoros, sobre todo los del siglo III d.C., unido a las posibles rutas de dichas gentes, ha sido un tema estrella en la historiografía de los siglos XIX-XX, que merece ser matizada y cuestionada, en vistas de un nuevo discurso (Martínez Chico y González García 2022).

2. OBJETIVOS

Uno de los objetivos es que, junto a los citados proxies (fases de ocupación y extensión de yacimientos), igualmente usaremos los tesoros monetarios como fuente demográfica. Hasta la fecha nadie lo ha realizado. Y, claramente, para nosotros es una magnífica oportunidad realizar dicha aproximación. A esto hay que sumarle el capital humano más importante: nuestra especialización en la numismática. El segundo objetivo ulterior es determinar y, si procede, consolidar una nueva línea de investigación histórica y/o arqueológica mediante el análisis de los hallazgos monetarios, en este caso, los tesoros. Los nuevos tiempos que corren en ciencia pueden constatarse tras las sólidas proyecciones curriculares de los investigadores galardonados con los Premios Nobel del año 2021. Hoy día las ciencias están siendo enfocadas en el ámbito de la simulación. Y es aquí donde nuestro proyecto se sitúa, por pretender rebasar las barreras de la numismáti-

ca tradicional y del conocimiento humano. Esta aproximación interesará a un nutrido elenco de especialistas de las ciencias humanas y sociales, no necesariamente restringido a especialistas en numismática o solo en arqueología. Es destacable el carácter de nuestro proyecto, planteado en el campo de la numismática antigua, una disciplina notoriamente poco desarrollada en la investigación española si se compara con otras líneas de trabajo. Por tanto, el impacto científico que se desea obtener es cambiar el actual paradigma numismático sobre el que tradicionalmente se ha ido trabajando y superar el estado descriptivo que se achaca a la numismática.

Nadie hasta la fecha había considerado los hallazgos monetarios como una fuente demográfica, ni tan siquiera como idea a fin de hacer dichas aproximaciones arqueológicas. En última instancia, la relevancia de este proyecto es revitalizar los estudios en humanidades.

3. METODOLOGÍA

En muchas aproximaciones a la evolución social y cultural de las sociedades del pasado, el número y la densidad de personas que viven juntas en un momento y una región determinados es un factor crucial. Dada la ausencia de información directa sobre la evolución demográfica pretérita, la fiabilidad y validez de los indicadores demográficos requieren de una evaluación cuidadosa, cuyo tema se ha abordado desde diferentes perspectivas (Schmidt *et al*. 2020). Lo primero de todo, en función de la parametrización propuesta, es definir y abordar las variables que vamos a utilizar. La metodología que proponemos nace de nuestra especialización en numismática. La metodología seguirá las líneas establecidas por Palmisano y colegas (Palmisano *et al*. 2017), los cuales tienen un largo bagaje en demografía. Palmisano *et al*. (2017) usaron series temporales de fechas sumadas a las de radiocarbono (García Puchol *et al*. 2017) junto a los datos extraídos de los yacimientos (extensión estimada), indicadores sustitutivos que han sido evaluados comparativamente. Nosotros, siguiendo dicho planteamiento, proponemos las siguientes variables, igualmente bajo un carácter diacrónico:

1) Número de ciudades en Hispania

2) Tamaños (ha)

3) Tesoros (apertura/cierre) ordenados cronológicamente por reinados o dinastías

El objeto de análisis es netamente urbano y no debe considerarse como demasiado amplio o inviable. Como se ha dicho, solo pretendemos analizar la extensión de las ciudades hispanas y sus fases de ocupación. Parece evidente que a mayor número de ciudades mayor número de habitantes, del mismo modo que a mayor tamaño de cada una de esas ciudades también podemos esperar un mayor número de personas en cada una de ellas. El número de ciudades se combinará con la extensión de cada una de ellas en intervalos de 50 años. Para ello, se dibujarán las plantas de cada una de las ciudades cada 50 años (desde el reinado de Augusto al siglo VI d.C.). En primer lugar, se revisa toda la bibliografía sobre urbanismo romano en la Península Ibérica. En segundo lugar, se dibujarán las plantas de las ciudades en esos periodos de 50 años como polígonos georreferenciados. Se trata de evitar la extensión de las ciudades romanas como un factor invariable a lo largo del tiempo. Además, sentaremos las bases para vaciar la información referida al número de asentamientos rurales (*villae* principalmente).

Esa curva se convertirá en un perfecto proxy del contingente demográfico de Hispania durante la dominación romana en época imperial, desde el reinado de Augusto al siglo VI d.C. Esa información será contrastada con la derivada de los tesoros monetarios, fechados en dichos márgenes cronológicos. El objetivo esencial es determinar si la evolución de los tesoros responde a la curva demográfica obtenida en el paso anterior. Pero más allá de detenernos en una comparación concreta, con el apoyo de R, un lenguaje de programación enfocado al análisis estadístico, se realizarán miles de simulaciones de cada una de las curvas para corregir los posibles sesgos de muestreo. Los resultados se constatarán con modelos teóricos nulos y/o permutaciones (Shennan *et al*. 2013; Timpson *et al*. 2014; Crema *et al*. 2016), y para abordar cuestiones como el “bias-wealth” (Timpson *et al*. 2014), o el efecto de la pérdida de información arqueológica, a través del tiempo, debido a factores tafonómicos. *A priori* habría que esperar que sí, pero parece que no. Parece demostrado que la mayoría de tesoros pertenece a fechas tardías, en concreto del noroeste hispano -*Gallaecia*- (Martínez Chico 2020). Obviamente tesoros como Tomares (con más de 50.000 monedas repartidas en 19 ánforas de tipo Tejarillo I, *cf*. Chaves Tristán 2017) demuestran que seguimos teniendo una visión muy parcial de la realidad. Por tanto, hay que mirar, por un lado, el número de ciudades (y en esta fase, tentativamente, las villas), y, por otro lado, nuestros tesoros monetarios. El principal problema se halla en que debe decidirse cuál es el tamaño de la ciudad cada 50 años a lo largo de seis siglos de presen-

cia romana.

Los resultados que se presentan se han conseguido con el programa R. Para ello, se han utilizado los paquetes sp (Pebesma y Bivand 2005; Bivand *et al*. 2013) y spstat (Baddeley *et al*. 2015) combinados con el paquete raster (Hijmans 2022) para calcular la densidad tanto de ciudades, como de tesoros y se ha completado la visualización con la utilización de los paquetes spatstat (Baddeley *et al*. 2015), ggmap (Kahle y Wickham 2013) ggplot2 (Wickham 2016), ggdensity (Otto y Kahle 2022), rasterVis (Lamigueiro y Hijmans 2022), lattice (Sarkar 2008) y latticeExtra (Sarkar y Andrews 2019). Se ha realizado un script que de forma automática repetirá el proceso en cada una de las categorías temporales que se definirán en el futuro (dinastías, reinados,…). En el estado actual de la investigación contamos con esa información en el caso de los tesoros, pero está pendiente la categorización de las ciudades que se ha demostrado más compleja (Sinner y Carreras Monfort 2019).

En la tesis de uno de nosotros (DMC), consagrada a la caracterización y a la historia monetaria de Hispania, se recogen más de 800 conjuntos monetarios procedentes de España y Portugal, suponiendo la primera obra realizada con estas características en España y Portugal (Martínez Chico 2020). En ella hemos abarcado seis siglos de aprovisionamiento e historia monetaria, con una visión global de conjunto y situando Hispania en el lugar que historiográficamente se merece. Nuestro *corpus* inédito dispone, por tanto, de una magnífica fuente de información, y con mucho potencial a fin de profundizar en nuevas vías de estudio. Sin embargo, la naturaleza de dichos testimonios es muy desigual a nivel cualitativo, ya que la mitad del material queda devaluado a mera noticia. Por tanto, habría que redefinir los datos y reelaborar una nueva base de datos, al objeto de obtener una base válida para la aproximación demográfica.

4. RESULTADOS

La comparación de la distribución de los hallazgos monetarios (n=409, $\bar{x}$=452, sd=3205.86, min=2, max=54000), con el tamaño de las ciudades (n=211, $\bar{x}$=16.81 Ha, sd=15.72, min=1, max=90), muestra algunas similitudes (fig. 1), pero también una notable diferencia en el valle del Ebro, apenas representado en los tesoros altoimperiales. Merece destacarse que tanto las ciudades como los tesoros presentan un modelo con dos máximos, uno de los cuales está centrado en el valle del Guadalquivir. Esto es así tanto si a la interpolación no se le aplica ningún peso (fig. 2), como si se realiza una ponderación basada en el tamaño de las mismas (fig. 1). El nivel de autocorrelación espacial de las ciudades presenta un patrón bimodal en el que las grandes ciudades se comportan de forma diferenciada (fig. 3).

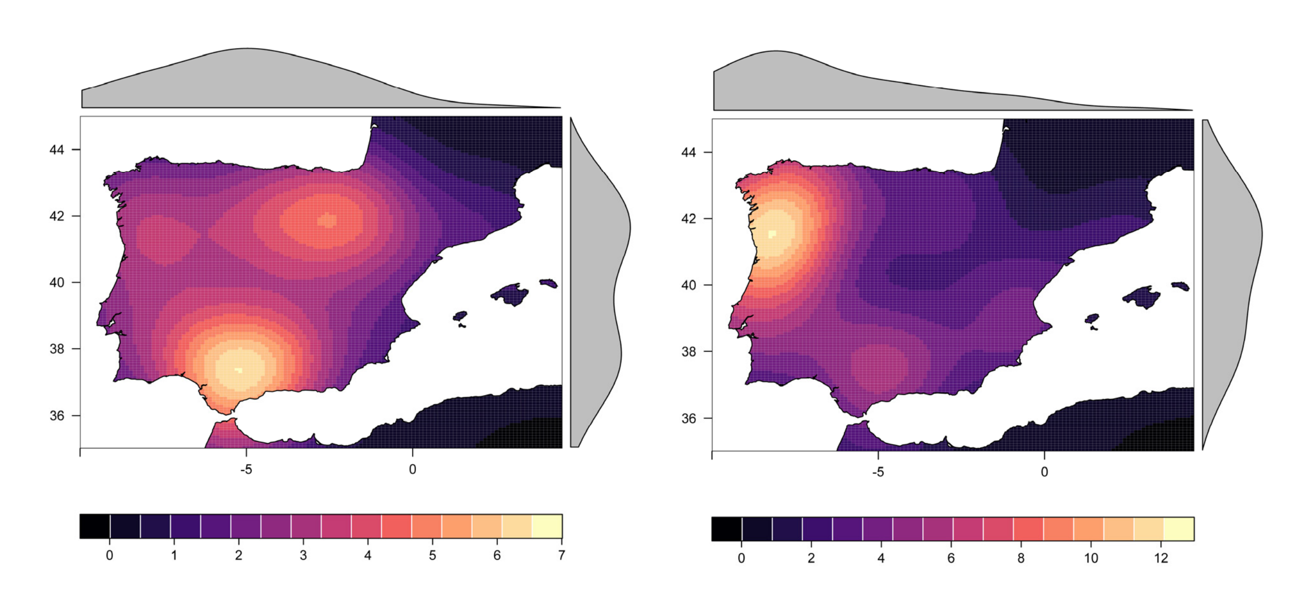


Figura 1. Mapa representado la densidad de ciudades y tesoros sin ponderación.

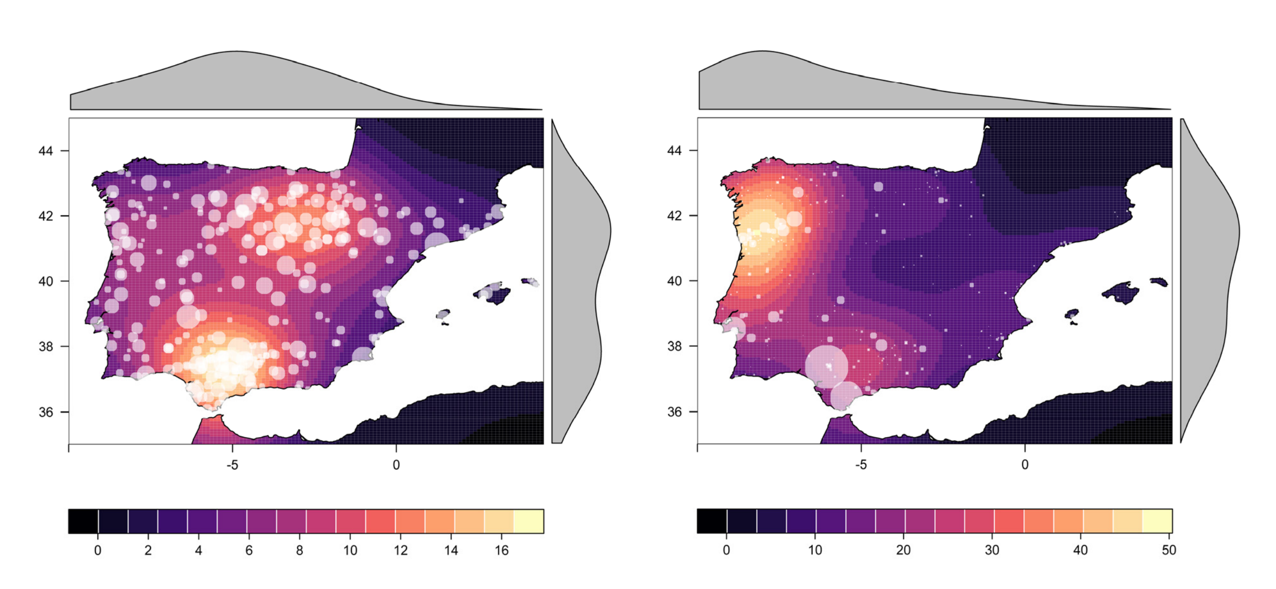


Figura 2. Mapa con la densidad ponderada de ciudades (tamaño) y tesoros (n.º de monedas).

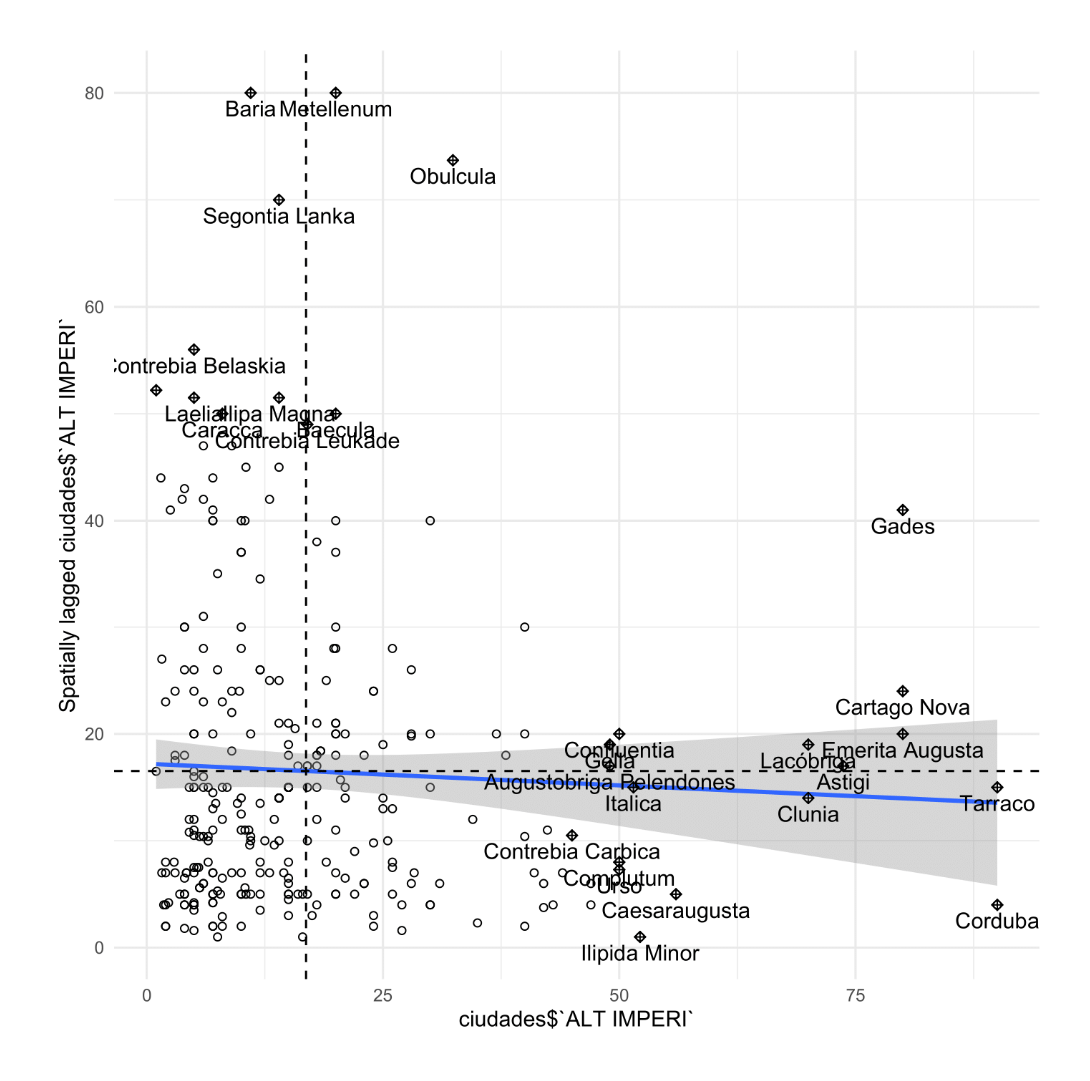


Figura 3. Autocorrelación espacial de ciudades por su tamaño.

Pero quizás lo más destacable es la presencia de un segundo foco en el valle del Duero que, al igual que ocurre con los tesoros, presenta una importante densidad de asentamientos. En el caso de los tesoros

nos remitimos a las conclusiones de uno de nosotros (Martínez Chico 2020), añadiendo el matiz de que la desviación que se suponía ocasionaba el tesoro de Tomares está en correlación con lo que se refleja en el estudio de las ciudades, con lo que podríamos sostener que el hallazgo del tesoro de Tomares más que una sorpresa, era algo predecible debido al alto grado de urbanización de la Bética (Valle del Guadalquivir). Las ciudades presentan un interesante patrón en el que se aprecia algún grado de correlación entre las ciudades pequeñas, pero prácticamente ninguno entre las grandes (fig. 3). Este fenómeno se ha explicado en el caso del noreste peninsular como fruto de la perduración de la estructura territorial indígena (Sinner y Carreras Monfort 2019).

5. CONCLUSIONES DE UN PROYECTO EN MARCHA

La paradoja histórica es que el noroeste de Hispania, concretamente el convento de Bracara, dispone de una especial concentración de tesoros. Esto se trata de algo que hemos demostrado y que vinculamos con el papel militar de la zona (Martínez Chico 2020). La *Gallaecia* es una zona militarizada y, al mismo tiempo, un granero de soldados. Nos preguntamos si este dato puede guardar relación con la demografía y la urbanización que como hemos visto en los resultados presenta un foco secundario en la zona (fig. 1). Tradicionalmente se afirma que el norte de Hispania estaba poco urbanizado en comparación, por ejemplo, con la Bética y otras provincias hispanas. La concentración de tesoros es clara. En su momento, Palmisano *et al*. (2017) ya adujeron con total razón que los presupuestos de investigación pueden determinar la medida en que las muestras se recogen y utilizan en una excavación arqueológica. Claramente los presupuestos de investigación dependen de algunas regiones más ricas en fechas de recolección. A ello podrían añadirse la alta probabilidad de recoger más muestras en determinados periodos cronológicos, como pueden ser monedas, inscripciones o cerámica, por lo que el factor dependencia habría que analizarlo y tenerlo siempre presente.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto se enmarca dentro de una investigación postdoctoral Margarita Salas, con financiación del Ministerio de Universidades y la Unión Europea (Next Generation EU).

6. BIBLIOGRAFÍA

Baddeley, A., Rubak, E. y Turner, R. (2015). *Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R*, London.

Binford, L. R. (1968). Post-Pleistocene adaptations. En S. R. Binford y L. R. Binford (eds.), *New Perspectives in Archaeology*, Chicago, pp. 313-341.

Bivand, R. S., Pebesma, E. J. y Gómez-Rubio, V. (2013). Classes for Spatial Data in R. *Applied Spatial Data Analysis with R*, 21-57. Springer, New York.

Carneiro, R. L. (1962). Scale Analysis as an Instrument for the Study of Cultural Evolution, *Southwestern Journal of Anthropology* 18(2), 149-169.

Carreras Monfort, C. (1996). Una nueva perspectiva para el estudio demográfico de la Hispania Romana. *Boletín del Seminario de Estudios de Arte y Arqueología* 62, 95-122.

Carreras Monfort, C. (2014). Nuevas tendencias y datos sobre la demografía romana en la Península Ibérica, *BSAA Arqueología* 80, 53-82.

Chaves Tristán, F. (2017). Reflexiones y estado de la cuestión en torno al tesoro de "El Zaudín" (Tomares, Sevilla), *Annali dell'Istituto Italiano di Numismatica* 63, 235-268.

Crema, E. R., Habu, J., Kobayashi, K. y Madella, M. (2016). Summed probability distribution of ^{14}C Dates suggests regional divergences in the population dynamics of the Jomon period in eastern Japan. *PLOS ONE* 11 (4). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154809

Feinman, G. M. (2011). Size, Complexity, and Organizational Variation: A Comparative Approach, *Cross-Cultural Research* 45(1), 37-58.

Feinman, G. M. y Neitzel, J. (1984). Too Many Types: An Overview of Sedentary Prestate Societies in the Americas, *Advances in Archaeological Method and Theory* 7, 39-102.

Fentress, E. W. B. (2009). Peopling the countryside: Roman demography in the Albegna Valley and Jerba. En A. Bowman y A. Wilson (ed.), *Quantifying the Roman Economy. Methods and Problems*, Oxford, 127-161.

García Puchol, O., Diez Castillo, A. y Pardo-Gordó, S. (2018). New insights into the neolithisation process in southwest Europe according to spatial density analysis from calibrated radiocarbon dates. *Archaeological and anthropological sciences* 10 (7), 1807-1820.

González García, A. (2015). La población de Roma de la Antigüedad Tardía al Alto Medievo (ss. III-X). En N. Vicent Ramírez y J. de Miguel López (ed.), *Roma y el Mundo Mediterráneo*, Alcalá de Henares, 269-279.

Gozalbes Cravioto, E. (2007). La demografía de la Hispania Romana tres décadas después. *Hispania Antiqua* 31, 181-208.

Hijmans R (2022). *Raster: Geographic Data Analysis and Modeling*. R package version 3.5-15.

Kahle, D. y Wickham, H. (2013). ggmap: Spatial Visualization with ggplot2, *The R Journal* 5/1, 144-161.

Lamigueiro, O. P. y Hijmans, R. (2022). *rasterVis*. R package version 0.51.2.

Martínez Chico, D. (2020). *Los tesoros imperiales de Hispania*, Valencia. Tesis doctoral de la Universitat de València. https://roderic.uv.es/handle/10550/76363

Martínez Chico, D. y González García, A. (2022). La integración de Hispania en el Imperio Galo (260-270). *Athenaeum* 110 (1), 152-192.

Naroll, R. (1956). A Preliminary Index of Social Development, *American Anthropologist New Series* 58(4), 687-715.

Neustupny, E. (1983). The demography of prehistoric cemeteries, *Pamatky Archaeologické* 74, 7-34.

Otto, J. y Kahle, D. (2022). *ggdensity: Interpretable Bivariate Density Visualization with 'ggplot2'*. R package version 0.1.0.

Palmisano, A., Bevan, A. y Shennan, S. (2017). Comparing archaeological proxies for long-term population patterns: An example from central Italy, *Journal of Archaeological Science* 87, 59-72.

Pebesma, E.J. y Bivand, R. S. (2005). Classes and methods for spatial data in R, *R News* 5 (2), pp. 9-13.

Perkins, P. (1999). *Etrusc an Settlement, Society and Material Culture in Central Coastal Etruria*, Oxford.

Sarkar, D. (2008). *Lattice: Multivariate Data Visualization with R*, New York.

Sarkar, D. y Andrews, F. (2019). *latticeExtra: Extra Graphical Utilities Based on Lattice*. R package version 0.6-29.

Schmidt, I., Hilpert, J., Kretschmer, I., Peters, R., Broich, M., Schiesberg, S., Vogels, O., Wendt, K. P., Zimmermann, A. y Maier, A. (2021). Approaching prehistoric demography: proxies, scales and scope of the Cologne Protocol in European contexts, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 376, 1816. https://dx.doi.org/10.1098/rstb.2019.0714

Sanders, W. T. y Price, B. J. (1968). *Mesoamerica: the Evolution of a Civilization, vol. 149*, New York.

Shennan, S., Downey, S. S., Timpson, A., Edinborough, K., Colledge, S., Kerig, T., Manning, K. y Thomas, M. G. (2013). Regional population collapse followed initial agriculture booms in mid-Holocene Europe, *Nature Communications* 4, 2486. https://doi.org/10.1038/ncomms3486

Shennan, S. y Edinborough, K. (2007). Prehistoric population history: from the Late Glacial to the Late Neolithic in Central and Northern Europe, *Journal of Archaeological Science* 34(8), 1339-1345.

Shennan, S. (2000). Population, Culture History, and the Dynamics of Culture Change, *Current Anthropology* 41(5), 811-835.

Shennan, S. (2001). Demography and Cultural Innovation: a Model and its Implications for the Emergence of Modern Human Culture, *Cambridge Archaeological Journal* 11(1), 5-16.

Shennan, S. (2009). Evolutionary demography and the population history of the European early Neolithic, *Human Biology* 81(3), 339-355.

Sinner, A. G. y Carreras Monfort, C. (2019). Methods of Palaeodemography: The Case of the Iberian Oppida and Roman Cities in North-East Spain, *Oxford Journal of Archaeology* 38(3), 302-324.

Timpson, A., Colledge, S., Crema, E. R., Edinborough, K., Kerig, T., Manning, K., Thomas, M. G. y Shennan, S. (2014). Reconstructing regional population fluctuations in the European Neolithic using radiocarbon dates: a new case-study using an improved method, *Journal of Archaeological Science* 52, 549-557.

Wells, P. S. (1984). *Farms, Villages and Cities. Commerce and Urban Origins in Late Prehistoric Europe*, Ithaca.

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*, New York.

Witcher, R. (2005). The Extended Metropolis – City, *suburbium* and population", *Journal of Roman Archaeology* 18, 120-138.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 182-191

Cartografía colaborativa e Infraestructuras de Información Espacial: Análisis de experiencias

J. Osorio Arjona [1]*, G. Orozco Frutos*[2]*, B. Pedregal Mateos*[3]

[1] *Centro de Ciencias Humanas y Sociales, CSIC. C. Albasanz 26, 28037 Madrid.*
[2] *Consultor GIS.*
[3] *Departamento de Geografía Humana, Universidad de Sevilla. C. Doña María de Padilla s/n, 41004 Sevilla.*

joaquin.osorio@cchs.csic.es, gaborofru@gmail.com, bpedregal@us.es

RESUMEN: La cartografía colaborativa y las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) presentan modos casi opuestos de creación, almacenamiento, acceso y difusión de los datos geográficos, pero con un gran potencial de combinación para ofrecer una información accesible, más ágil, pero con la calidad suficiente para contribuir a la toma de decisiones. Con el objetivo de valorar el estado de la integración de la cartografía colaborativa con las IDE, se ha realizado una revisión profunda de 44 mapas webs colaborativos mediante una serie de indicadores enfocados en el objetivo del mapeo colaborativo y en las principales características de un modelo de geoportal abierto basado en crowdsourcing, que consisten básicamente en: apoyo en tecnologías de código abierto, disponibilidad de servicios asociados a los estándares OGC, calidad y metadatado de los datos, posibilidad de descarga y reutilización de los datos, subida y control de datos, búsqueda, filtros e interacción con los datos, amigabilidad e interacción dinámica con la página web, e interacción entre usuarios. Los resultados indican que los mapas webs colaborativos que mejor cumplen con la normativa IDE son algunos proyectos de iniciativa académica o institucional. Sin embargo, estos son los minoritarios, por lo tanto, todavía queda camino que recorrer para que se produzca una amplia convergencia entre la cartografía colaborativa y las IDE.

Palabras-clave: cartografía colaborativa, Infraestructuras de Datos Espaciales, tipología de proyectos, integración VGI-IDE.

1. INTRODUCCIÓN

En las dos últimas décadas, desde la popularización de la web 2.0., numerosos autores han discutido sobre la necesidad de integración de los proyectos de cartografía colaborativa y las Infraestructuras de Datos Espaciales (Goodchild, 2007, Budhathoki et al., 2008, McDougall, 2009, Sui et al., 2013, Mateos, 2013, Ojeda et al., 2015, Demetriou et al 2017, Olteanu-Raimond, 2017). Algunos han destacado el interés de esta integración, así como el reto que supone, dado el carácter tan distinto, casi opuesto de estas dos fórmulas de creación, almacenamiento, acceso y difusión de los datos geográficos.

Por una parte, como señala Craglia (2007), la mayoría de las infraestructuras de datos espaciales (IDE) en todo el mundo, como por ejemplo las elaboradas bajo INSPIRE, son en esencia una iniciativa institucional enfocada fundamentalmente al servicio del "gobierno a gobierno", para facilitar el descubrimiento, el acceso y el uso de datos (oficiales) distribuidos. Como tal, supuso una extensión del paradigma SIG de escritorio: los datos pueden distribuirse, pero se supone que serán accedidos y manejados por expertos que utilizan SIG de escritorio. Por lo tanto, el público objetivo se centró desde el principio en los usuarios expertos. En contraste, el fenómeno de la cartografía colaborativa y la información geográfica generada de forma voluntaria (VGI, *Volunteer Geographic Information*), carece del respaldo oficial o de garantía de calidad, al tener un enfoque de "no expertos para no expertos". En ese sentido, Craglia destaca el carácter flexible y dinámico de los proyectos VGI que califica como "gacelas" frente a la rigidez e institucionalización de las IDE que ve como "elefantes". Ante la pregunta de si estos dos desarrollos paralelos pueden ser capaces de confluir y converger, la respuesta entonces fue positiva, fundamentada en la necesidad de conciliar ambos desarrollos con objeto de ofrecer una información accesible, más ágil, pero con la calidad suficiente para contribuir a la toma

de decisiones.

Pese a este interés y a lo rápido que evolucionan las soluciones tecnológicas, las distintas fórmulas para generar y compartir datos (incluidas las redes sociales), y las políticas públicas favorables a la construcción del concepto de gobierno abierto, Demetriu et al. (2017) apuntan que existe aún una integración escasa de ambos fenómenos (VGI-IDE). Para estos autores, la VGI no puede regirse a través de un marco estricto como el que se aplica por INSPIRE, fundamentalmente porque los proyectos colaborativos carecen por definición de una estructura jerárquica en su configuración. Por lo tanto, continúan, la atención debe centrarse en los aspectos mínimos que garanticen la interoperabilidad, la credibilidad y la seguridad de los servicios y datos. Pasados 5 años desde esta revisión, este trabajo valora el estado de la integración VGI-IDE por medio del análisis de las principales características de diversos geoportales colaborativos seleccionados.

2. METODOLOGÍA

La identificación de proyectos de cartografía colaborativa se ha basado, en primer lugar, en la búsqueda bibliográfica en bases de datos de *Google Scholar*, *Scopus, Web of Science*, y *Mendeley*, en donde se han tratado de localizar todos aquellos trabajos publicados en los últimos cinco años en los que se analizan o presentan mapas web colaborativos. Paralelamente, se han empleado motores de búsqueda para identificar otros posibles proyectos colaborativos. Ambas búsquedas se han basado en palabras claves agrupadas en dos grandes ámbitos temáticos (Tabla 1): por un lado, palabras relacionadas con la cartografía colaborativa y la información geográfica voluntaria; y, por otro, palabras claves asociadas a las tecnologías de infraestructuras de datos espaciales. En ambos casos se han utilizado tanto las acepciones españolas como inglesas. Ambas búsquedas se realizaron paralelamente entre 1 de febrero de 2021 y 30 de abril de 2022, de modo que los resultados y análisis que aquí se presentan se corresponden con ese periodo temporal.

Tabla 1. Palabras claves utilizadas en la búsqueda de mapas web colaborativos. Fuente: Elaboración propia. Columna izquierda: inglés; Columna derecha: equivalente en español.

MAPAS COLABORATIVOS	
▪ Collaborative mapping, collaborative cartography, collaborative map, collaborative web mapping, collaborative web map, collaborative atlas.	▪ Cartografía colaborativa, mapeo colaborativo, mapa colaborativo, mapeo web colaborativo, mapa web colaborativo, atlas colaborativo.
▪ Community mapping, community geoportal, community map, community web map, community-based geoportal.	▪ Mapeo comunitario, geoportal comunitario, mapa comunitario, mapa web comunitario
▪ Crowdsourcing mapping, crowdsourcing cartography, crowdsourcing map, crowdsourcing geoportal, crowdsourcing web map, crowdmapping.	▪ Cartografía colectiva, mapeo colectivo, mapa colectivo, geoportal colectivo, mapa web colectivo, mapeo participativo.
▪ Collaborative GIS, PPGIS.	▪ SIG colaborativo, SIG participativo.
▪ Volunteer Geographic Information (VGI), volunteer mapping, volunteer cartography.	▪ Información Geográfica Voluntaria (IGV), mapeo voluntario, cartografía voluntaria.
INFRAESTRUCTURAS DE DATOS ESPACIALES	
▪ Spatial Data Infrastructure (SDI), interoperability, open spatial data, open geospatial data, Open Geospatial Consortium (OGC), INSPIRE.	▪ Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), interoperabilidad, datos espaciales abiertos, datos geoespaciales abiertos, Consorcio Geoespacial Abierto, INSPIRE.

Con objeto de realizar un análisis comprensivo del estado de la cuestión, se han definido una serie de indicadores basados en los trabajos de Vahidnia y Vahidi (2021) y Laconi et al. (2018) (Tabla 2). De esta forma, se analizan cinco dimensiones de los proyectos colaborativos con objeto de responder a las siguientes preguntas: (1) ¿Quién tiene la iniciativa del proyecto?; (2) ¿Cuál es el alcance del proyecto en cuanto a grado de participación y escala espacial de la información representada?; (3) ¿Qué características básicas de visualización e información presenta el geoportal y que posibilidades de reutilización de datos ofrece?; (4) ¿Cómo se gestiona la colaboración con el proyecto? ¿Qué funciones de consulta de la información o de interacción con otros usuarios presenta?; (5) ¿Cuál es su duración y qué actualización presenta la información que contienen?

Tabla 2. Indicadores utilizados para la caracterización de los mapas webs colaborativos. Fuente: Elaboración propia, basada en Vahidnia y Vahidi (2021) y Laconi et al. (2018).

CATEGORÍAS DE ANÁLISIS	*CRITERIOS DE VALORACIÓN*	*DESCRIPCIÓN*
1. Iniciativa	Entidad promotora	Detalla quién impulsa la iniciativa
	Tipo de iniciativa	Observa el carácter del proyecto en relación con la entidad promotora: institucional, académica, ONGs o ciudadana (particulares, asociaciones de vecinos o empresas)
2. Ámbito y alcance	Número de registros	Mide el grado de participación en el proyecto, según el número de informes, puntos o entidades representados en el mapa
	Escala espacial	Encuadra el ámbito territorial del proyecto: internacional, nacional, regional, o local
3. Características IDE	Tecnología empleada	Identifica la tecnología empleada en la elaboración de la plataforma web y si es de código abierto (OS)
	Cartografía de base	Identifica los servidores de mapas base sobre los que se visualizan los datos
	Servicios OGC	Analiza si el mapa web cuenta con alguno de los siguientes servicios de mapa OGC: WMS, WMTS, WCS, WFS
	Metadatos	Indica si los datos presentan: título, autoría, fecha de publicación, fecha del evento, localización espacial del evento, categoría temática en la que se recoge el evento, descripción básica del evento y fuentes de información disponibles. (Si/No)
	Funciones de descarga	Se analiza si el proyecto incluye funciones que permiten a los usuarios descargar los datos disponibles (Si/No)
4. Modelo de gestión e interacción	Modalidad para añadir información	Identifica el método que tiene el usuario para incorporar sus datos al mapa, ya sea mediante formularios supervisados por un equipo de administración, de forma directa sobre el mapa sin supervisión de los administradores, o enviando la información por otros medios al admin.
	Funciones de filtrado y consulta	Valora las herramientas de filtrado, búsqueda y consulta sobre el mapa y sus datos, distinguiendo entre consultas de tipo espacial, temporal, o temática
	Nivel de accesibilidad	Mide la facilidad de acceso al mapa desde la plataforma web, distinguiendo entre el acceso directo al mapa (fácil), el acceso no directo, pero visible en la página web del proyecto (medio), o el acceso no directo y poca visibilidad en la página web del proyecto (difícil).
	Interacción entre usuarios	Detalla si existe la posibilidad de recibir feedback, valoraciones o comentarios de otros usuarios (Si/No)
5. Duración	Año de inicio-última actualización	Permite evaluar el estado de actividad o abandono del proyecto mediante el tiempo que ha pasado desde el año de inicio del proyecto y el último año de actualización

Respecto a otras revisiones similares realizadas con anterioridad este trabajo supone una ampliación del enfoque y de las características a analizar, pues ahora se pretende fundamentalmente valorar el grado de convergencia entre la cartografía colaborativa y las infraestructuras de datos espaciales. Para ello, el análisis se enfoca particularmente en las principales características de un modelo de geoportal abierto basado

en crowdsourcing, que consiste básicamente en: apoyo en tecnologías de código abierto, disponibilidad de servicios asociados a los estándares OGC, calidad y metadatado de los datos, posibilidad de descarga y reutilización de los datos, subida y control de datos, búsqueda, filtros e interacción con los datos, amigabilidad e interacción dinámica con la página web, e interacción entre usuarios (Vahidnia y Vahidi, 2021).

3. RESULTADOS

3.1. Identificación y tipología de proyectos colaborativos

La Tabla 3 detalla los mapas web colaborativos encontrados en función del objetivo o fin para el que han sido diseñados. En total se han identificado 44 proyectos activos de los que 5 tienen como objetivo la denuncia de conflictos medioambientales; 6 están relacionados con la necesidad de colaboración surgida en el contexto de crisis ambientales y/o humanitarias; 6 están enfocados hacia la sensibilización sobre temas sociales, culturales y/o de educación ambiental; 9 dan visibilidad a iniciativas de desarrollo local y promueven la gobernanza y valores de sostenibilidad en esta escala; 14 son proyectos académicos insertados en el marco teórico de la ciencia ciudadana; finalmente 4 proyectos presentan un carácter misceláneo que no encaja en ninguna de las anteriores categorías y que responden fundamentalmente a iniciativas para recopilar información de los interesados (como ubicación de tiendas de criptomonedas, tiendas de discos, restaurantes sin gluten, o descripción cualitativa de los barrios de las ciudades).

Tabla 3. Clasificación de los mapas webs encontrados según su objetivo. Fuente: Elaboración propia a partir de búsqueda bibliográfica y de páginas web (01/02/2021 a 30/04/2022).

OBJETIVO	*NOMBRE DEL PROYECTO*	*DIRECCIÓN URL*	Nº
Denuncia de conflictos ambientales	EJAtlas –Global Atlas of Environmental Justice	https://ejatlas.org/	5
	Mapa de los conflictos mineros en América Latina	https://mapa.conflictosmineros.net/ocmal_db-v2/	
	Mapa conflictos socioambientales en Chile	https://mapaconflictos.indh.cl/	
	Mapa de los conflictos del agua en Andalucía	https://redandaluzaagua.org/mapa/	
	iWitness Polution Map	http://map.labucketbrigade.org/	
Crisis ambientales y/o humanitarias	Typhoon Haiyan	https://haiyan.crowdmap.com/	6
	Incidencias Nevada Filomena	https://aavvmadrid.org/incidencias-nevada-filomena/	
	I Got Vaccinated	https://arcg.is/1Cqiaj	
	PhotoMappers: Crowdsourced disaster photo mapping	https://experience.arcgis.com/experience/d61a17e1e24c4bcc9d61dd4615616042/	
	FireMappers: Wildfire Early Notification Project	https://gis-fema.hub.arcgis.com/apps/napsg::firemappers-wildfire-early-notification-web-app-5ff0e/	
	Russia-Ukraine Monitor Map	https://maphub.net/Cen4infoRes/russian-ukraine-monitor	
Sensibilización sobre temas socioculturales, educación ambiental	Audiomapa de Latinoamérica	http://www.audiomapa.org/	6
	Andalucía Soundscape	http://www.andaluciasoundscape.net/mapa/	
	Atlas de la diversidad cultural	http://www.atlasdeladiversidad.net	
	Mississipi: an anhtropocene river	https://mississippi.rivertoday.org/4.00/39.77000/-92.75000	
	Toca Madera: Mapa colaborativo construcción con madera	https://tocamaderablog.com/mapa-colaborativo/	
	#YoNoMeLaJuego: Mapa colaborativo de casas de apuestas	https://www.scout.es/mapa-colaborativo-yonomelajuego/	
Desarrollo local y promoción de	CIVICS: Impulsa tu ciudad	https://civics.cc/es/#!/iniciativas	9
	Barcelona + Sostenible	http://bcnsostenible.cat/	
	Voice of Kibera	http://voiceofkibera.org	

los valores de soste-niblidad y gobernanza	Uchaguzi: Transparency and accounta-bility in Kenya's General Elections	https://uchaguzi.or.ke/views/map	
	Commute Orlando	http://commuteorlando.com/wordpress/collabora-tive-maps/	
	Walking Malta	http://www.walkingmalta.com/	
	Mis mapas, mis datos	https://www.zaragoza.es/sede/portal/idezar/mis-mapas-misdatos/	
	Birdability Map: accessibility features of birding locations	https://gis.audubon.org/birdability/	
	Infracciones de terrazas de hostelería en el municipio de Madrid	https://aavvmadrid.org/infracciones-terrazas-hos-teleria-madrid/	
Ciencia ciu-dadana -Pro-yectos am-bientales científicos	Citclops: Citizen's Observatory for Coast and Ocean Optical Monitoring	http://www.citclops.eu/ https://www.eyeonwater.org/search/	14
	CoastSnap: Community Beach Monito-ring	https://www.coastsnap.com/map	
	Huella Ciclista de Madrid	https://huellaciclistademadrid.es/	
	Biomodelos: modelos de distribución de las especies existentes en Colombia	http://biomodelos.humboldt.org.co/	
	Mapa colaborativo de regadíos históri-cos de Granada y Almería	https://regadiohistorico.es/espacios-de-regadio	
	Freesound: mapa de los sonidos del mundo	https://freesound.org/browse/geotags/	
	First Known Photographs of Living Spec-imens	https://www.inaturalist.org/projects/first-known-photographs-of-living-specimens	
	Biodiversity of the Anacostia River	https://www.inaturalist.org/projects/biodiversity-of-the-anacostia-river	
	Denver EcoFlora Project	https://www.inaturalist.org/projects/denver-eco-flora-project	
	Found Feathers: using found feathers as observations as reference specimens	https://www.inaturalist.org/projects/found-feath-ers	
	IdroGEO: Italian landslide and flood hazard	https://idrogeo.isprambiente.it/app/	
	NASA Landslide Viewer	https://maps.nccs.nasa.gov/arcgis/apps/webap-pviewer/in-dex.html?id=824ea5864ec8423fb985b33ee6bc05b7	
	FloodCitySense	http://www.floodcitisense.eu/	
	eBird: Cornell Lab of Ornithology	https://ebird.org/	
Otros temas	Coin ATM Radar	https://coinatmradar.com/	4
	HoodMaps: City Neighborhood Maps	https://hoodmaps.com/	
	Record Store	https://recordstores.love/	
	Gluten free restaurants collaborative map	https://glutenlibre.co/en/gluten-free-collaborative-map/8	

Por otro lado, se han identificado 20 mapas webs destacados en artículos científicos o portales de noticias a los que actualmente no se puede acceder. El principal motivo es el carácter puntual de algunos de ellos, cuyo objetivo es reportar crisis ambientales y/o humanitarias o hacer un seguimiento de las elecciones. Una vez se ha acabado el conflicto, o crisis cartografiada o pierden interés y soporte financiero, dejan de ser mantenidos, por lo que los dominios webs en los que se alojan caducan. Otro motivo por el que no se han podido acceder a algunos de estos mapas es el cierre de la plataforma *Crowdmap* a principios del año 2021.

3.2. Análisis y caracterización de los proyectos

Tras esta identificación preliminar de mapas web colaborativos, a continuación, se abordan las cinco dimensiones de análisis detalladas en el apartado metodológico referidas a: 1) la iniciativa del proyecto; 2) ámbito y alcance; 3) características IDE; 4) modelo de gestión e interacción con la información y, finalmente, 5) duración y actualización.

3.2.1. Iniciativa del proyecto

Comenzando con el análisis de a quién corresponde la iniciativa del proyecto, todos los mapas que denuncian conflictos medioambientales, o que reportan crisis humanitarias y/o ambientales puntuales corresponden principalmente a iniciativas de organizaciones no gubernamentales, y/o académicas, con alguna excepción como el *Mapa de conflictos socio-ambientales en Chile*, impulsado por el Instituto Nacional de Derechos Humanos de Chile, de carácter institucional, y el *Mapa de incidencias provocadas por la Nevada Filomena* impulsado por las asociaciones vecinales de Madrid*.* En el caso de los mapas enfocados a la sensibilización o difusión de temas socio-culturales, predominan las iniciativas académicas, aunque en esta categoría se encuentra también alguna iniciativa personal y/o empresarial (que aquí se engloban en la categoría ciudadana) que promueven proyectos de recopilación y difusión de paisajes sonoros (*Audiomapa de Latinoamérica*, *Andalucía Soundscape)* o el uso de materiales de construcción sostenibles como la madera (proyecto *Toca Madera*). Por su parte, los mapas que promueven el desarrollo local, los valores de sostenibilidad y gobernanza corresponden por partes iguales a iniciativas académicas, institucionales y, en mayor medida, a organizaciones no gubernamentales. En este caso, la excepción corresponde de nuevo a una iniciativa de asociaciones vecinales de Madrid en apoyo a la denuncia y control de las Infracciones de terrazas de hostelería en el municipio. Finalmente, los proyectos enfocados en el marco teórico de la ciencia ciudadana corresponden por definición a iniciativas académicas, mientras que los mapas enmarcados en "otros temas" corresponden a iniciativas ciudadanas y/o empresariales para recopilar información de interés de sus promotores.

3.2.2. Ámbito y alcance

En cuanto al alcance del proyecto, existe una gran variedad tanto en el grado de participación como en la escala espacial. Los mapas web con mayor grado de participación cuentan con un número de registros mayor al millar, sobrepasando 6 de ellos los diez mil registros (*iWitness Polution*, *FreeSound: mapa de los sonidos del mundo, eBird*, *Nasa Landslide Viewer*, *Found Feathers*, y *Denver EcoFlora Project*). Mientras, los mapas web con un número de participación más bajo suelen contar con centenares de registros y salvo contadas excepciones suelen ser mapas de temas de sensibilización cultural y de iniciativa ciudadana. Se puede observar cómo los mapas webs con mayor número de registros son por lo general proyectos de ciencia ciudadana, destacando los mapas vinculados a la observación de la naturaleza y los del proyecto iNaturalist, iniciativa conjunta de la Academia de Ciencias de California y la *National Geographic Society* (mapas: *First Known Photographs of Living Specimens*, *Biodiversity of the Anacostia River*, *Denver EcoFlora Project* y *Found Feathers*). Algunos de ellos recogen observaciones a escala regional, por lo que se deduce que el grado de participación no está necesariamente vinculado a la escala de observación y representación cartográfica.

Aunque casi todos los mapas muestran el número de registros que poseen, hay que mencionar 3 casos en los que no se ha podido obtener este número, porque la visualización de los datos no es cuantificable (en forma de celdas en el caso de *Walking Malta,* de líneas en *Mapa colaborativo de regadíos históricos de Granada y Almería*, o de texto en el caso de *HoodMaps*). Tampoco se ha podido obtener el número de registros del proyecto *Birdability Map* debido a que contiene miles de registros en forma de punto, pero no facilita el número concreto de datos representados en el mapa.

3.2.3. Características IDE

De los 44 mapas webs estudiados, 13 están sustentados en tecnologías de código abierto, principalmente a partir de las librerías *Leaflet* y *OpenLayers*, y la plataforma *Ushahidi.* Estas tecnologías de código abierto se encuentran en casi todos los geoportales de denuncia de conflictos ambientales, con la excepción del Mapa de los conflictos socioambientales de Chile, que se basa en la plataforma de *Google Maps*, y en un buen número de mapas webs enfocados en desarrollo local y promoción de valores de sostenibilidad y gobernanza (como es el caso de *CIVICS: Impulsa tu Ciudad, Barcelona + Sostenible, Voice of Kibera* o *Walking Malta*). Respecto a los mapas webs que no usan código abierto, la principal tecnología usada procede de la compañía *Google*. Esta tecnología es la mayoritaria respecto al total de mapas webs analizados, siendo la base de 17 geoportales. También destaca la plataforma *ArcGIS Online* de la empresa *ESRI*, desde la cual se han creado 7 geoportales. Casi todos los mapas webs enfocados en crisis ambientales y humanitarias, sensibilización sobre temas socioculturales, ciencia ciudadana, y en la categoría miscelánea de otros temas, están sustentados en plataformas propietarias.

Existe una relación directa entre la tecnología de código abierto usada para la realización de los mapas

y la cartografía de base utilizada para la representación, siendo *OpenStreetMaps* la base cartográfica presente en la mayoría de los casos. Esta base se encuentra disponible en 17 geovisores. Por su parte, los mapas webs sustentados en tecnología de *Google* usan siempre *Google Maps* como mapa base, del mismo modo que los geoportales de *ArcGIS Online* utilizan mapas bases de la empresa *ESRI*. Algunos mapas webs, como *EJAtlas, CIVICS, Idrogeo, Walking Malta,* o *Russia-Ukraine Monitor Map*, cuentan con una combinación de cartografía base de diferentes fuentes. Por último, un número muy reducido de mapas (*Barcelona + Sostenible,* y *Missisipi: an Anthropocene River*) presentan cartografía base sin información.

Muy pocos mapas webs colaborativos generan o comparten servicios estándares OGC. Sin embargo, se ha comprobado que algunos sí consumen servicios WMS o WFS externos para enriquecer la información cartográfica de sus geovisores. Los datos suelen estar recogidos en capas de puntos que no se comparten con el usuario, y por tanto solo se pueden visualizar dentro del mapa web. La única interacción dinámica que ofrecen al usuario es la posibilidad de activarlas o desactivarlas, o la posibilidad de abrir un menú de información al clicar sobre un punto. Sólo se han encontrado 3 geoportales que permiten compartir datos mediante servicios estándares OGC (*Biomodelos,* los *Mapas colaborativos del Ayuntamiento de Zaragoza* y *EjAtlas*). Hay que mencionar también el caso de los mapas basados en *ArcGIS Online* (*PhotoMappers, FireMappers, Biomodelos, IdroGEO y Nasa Landslide Viewer*), ya que presentan servicios para compartir y reutilizar datos, pero estos servicios no son estándares OGC, sino que son servicios propios de *ArcGIS*.

En cuanto a los metadatos, en cierta medida, toda la información reflejada en los mapas posee metadatos, aunque no todos cumplen los mínimos que se para que estos se puedan considerar estándares. Empleando el baremo de mínimos que establece el Núcleo Español de Metadatos en base a la norma de contenido ISO 19115 (título del conjunto de datos, fecha de referencia, idioma, categoría del tema, resumen descriptivo, autor de contacto, y fecha de creación de los metadatos) se comprueba que sólo los datos de 6 están metadatados (*EjeAtlas, Conflictos del agua en Andalucía, PhotoMappers, FireMappers, Biomodelos* y *eBird*).

3.2.4. Modelo de gestión e interacción

La modalidad para añadir información más comúnmente empleada es a partir de formularios. La riqueza de la información que muestran los datos depende del grado de detalle con el que se han elaborado los formularios. La contribución mediante formulario es posteriormente supervisada por el equipo encargado del mantenimiento y actualización del mapa web antes de su publicación. Por otro lado, existe un número muy reducido de mapas webs en los que el usuario puede publicar directamente su información sin aprobación previa del equipo de administración. Estos geoportales se basan en la plataforma de *Google* (como *Toca Madera* o *Commute Orlando*), o en la tecnología *ESRI* (por ejemplo, *Huella Ciclista de Madrid*). Una última modalidad encontrada permite que los usuarios reporten los datos a partir de diferentes redes sociales (Facebook, Twitter, Instagram), *WhatsApp* e incluso mensajes *sms*. Es el caso de *Russia-Ukraine Monitor Map, Walking Malta* y *Uchaguzi*, todos ellos creados a partir de tecnologías abiertas (*Maphub, Leaflet* y *Ushahidi*, respectivamente).

Más de la mitad de los mapas webs analizados (24) permiten la descarga de los datos. La mayoría de los mapas webs que se sustentan en la plataforma *Ushahidi* permiten la descarga de datos. Otros creados con otras plataformas, como los mapas del proyecto *iNaturalist, CIVICS*, *Barcelona+Sostenible* o el *Mapa de conflictos socioambientales en Chile* también permiten la descarga de registros. En todos estos casos, el formato de los datos descargados es de ficheros *.xml* o *.csv*. Los mapas webs basados en tecnología *Google,* en cambio, no cuentan con ese formato de descarga de datos, pero permiten la descarga en formato *.kml*. Unos pocos geoportales (los mapas webs colaborativos del Ayuntamiento de Zaragoza y algunos proyectos basados en ciencia ciudadana como *Biomodelos*, *Citclops, IdroGEO, NASA Landslide Viewer,* o *FloodCitySense*) presentan la opción de descargar los datos en formato *.json*. Por último, los tres mapas webs de temática relacionada con el sonido (*FreeSound: mapa de los sonidos del mundo, Audiomapa de Latinoamérica* y *Andalucía Soundscape*) permiten la descarga de sus registros en formato *.mp3*.

Para valorar la capacidad de consulta y filtrado de datos en estos proyectos se ha tenido en cuenta la disponibilidad de filtros temporales, espaciales o temáticos. Como resultado, se ha encontrado que tan solo 4 visores cuentan con las 3 funciones de búsqueda y filtrado sobre sus mapas, éstos están implementados sobre plataformas online (*Google Maps, ArcGIS Online* y *Maphub*) y no sobre librerías de código abierto. Igualmente, de los visores que han desarrollado 2 de los filtros tenidos en cuenta (unos 13 visores) tan solo 4 se han realizado con librerías de código abierto. Este hecho pone de relieve la complejidad que conlleva el desarrollo de este tipo de funciones y cómo las plataformas preconstruidas que ya tienen diseñadas estas

funcionalidades favorecen su implementación. Por otro lado, en el caso opuesto, ninguno de los visores realizados con la plataforma *Google My Maps* dispone de ningún tipo de filtro ya que dicha plataforma no ofrece esta función, lo que imposibilita (al tratarse de una plataforma cerrada) el desarrollo por parte de los usuarios. De entre todos los filtros, el temático es el que está más presente (23 visores sobre 44), seguido del espacial con 17 visores y el temporal con 12. Por último, hay que destacar que 13 visores no poseen ningún tipo de filtro de búsqueda.

Por lo que respecta a la facilidad de acceso al mapa, de forma general, la mayoría presenta buena accesibilidad desde la página home de la web en la que se encuentran insertados, por lo que un usuario puede acceder al mapa y navegar fácilmente, visualizar los datos, e interaccionar con ellos según el nivel de desarrollo de las funciones de consulta y descarga ya reseñados. Sin embargo, las páginas web de *PhotoMappers* y *FireMappers,* y los geoportales de proyectos científicos de ciencia ciudadana como *Citclops, CoastSnap, Biomodelos, eBird*, y *FloodCityTense* presentan un bajo grado de accesibilidad, haciendo más compleja la interacción del usuario con el mapa.

Desde un punto de vista del uso del mapa web como una red de interacción entre usuarios, pocos mapas webs presentan la posibilidad de dejar comentarios en los registros o fichas publicados. La mayoría de estos geoportales requieren del registro e identificación previa del usuario en la página web. De esta forma, un usuario registrado puede interaccionar con otros usuarios mediante el envío de comentarios. Algunos mapas creados en la plataforma *Ushahidi* o basados en ciencia ciudadana (como *CoastSnap, Biomodelos* o los mapas webs del proyecto *iNaturalist)* posibilitan dejar comentarios en los registros y permiten la interacción entre usuarios. Otros mapas webs que permiten la interacción entre usuarios en los registros son *EJAtlas, Conflictos del Agua en Andalucía,* o *iWitness Polution Map*. También cabe destacar el caso de *FreeSound y Barcelona+Sostenible*, en el que la interacción entre usuarios se realiza en un foro anexo en la página web. Casi todos los mapas webs colaborativos cuentan con medios para que los usuarios puedan contactar con el equipo encargado de actualizar y mantener el mapa, principalmente mediante una sección de contacto que incluye el correo electrónico del equipo de administración.

3.2.5. Duración y actualización

Finalmente, cabe mencionar que la mayoría de los mapas web colaborativos analizados en este trabajo están actualizados y abiertos a la contribución, a excepción de los mapas cuyo objetivo es cartografiar una crisis humanitaria o ambiental puntual que permiten la consulta, aunque no la actualización, ya que las crisis puntuales por definición son finitas en el tiempo.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo ha realizado una revisión de mapas webs colaborativos disponibles en internet con el objetivo de comprobar el grado de cumplimiento de las características que requiere una IDE y analizar, de este modo, si se está produciendo una convergencia entre la cartografía colaborativa y la normativa en la que se sustentan las IDE. Los principales resultados obtenidos señalan que queda mucho trabajo por delante en la convergencia de las IDE y la cartografía colaborativa. Aunque los mapas webs colaborativos suelen configurarse como portales amigables, con filtros de consulta fáciles de usar y que permiten la interacción entre usuarios, estos geoportales rara vez cuentan con servicios interoperables basados en estándares OGC o permiten la reutilización de los datos.

La dinamicidad de la información y multiplicidad de actores implicados en los proyectos colaborativos supone una complejidad añadida a la hora de desarrollar una IDE funcional y completa que cumpla con los estándares establecidos por *el Open Geospatial Consorcium* o por la iniciativa INSPIRE de la Unión Europea. De esta forma se comprueba que, aunque varios mapas webs presentan una serie de metadatos básicos, muy pocos proyectos alcanzan el baremo mínimo establecido por el Núcleo Español de Metadatos.

En general, se distinguen dos tipos de proyectos de mapas colaborativos. Por un lado, los mapas creados con plataformas previamente diseñadas y construidas, que no tienen como prioridad el desarrollo de una IDE, por lo que el usuario se limita a implementar un mapa con el fin de recopilar datos sobre la temática del proyecto, descartando así la posibilidad de compartir los datos cumpliendo los estándares establecidos. Por otro lado, se han encontrado proyectos implementados con librerías de código abierto que implican un desarrollo más complejo por parte del promotor del mapa y que en muchos casos centran su esfuerzo en conseguir un mapa funcional con el objetivo de recopilar datos y gestionar la interacción con los usuarios, pero no con el fin de compartir esa información con los requisitos establecidos por los estándares existentes.

Las diferentes escalas de estudio (local, regional, nacional, internacional), la diversa y compleja naturaleza de los datos recopilados (mapas de sonidos, mapas de conflictos ambientales o crisis humanitarias, mapas de eventos puntuales, mapas de toma de imágenes geoposicionadas, etc.), las diferentes formas de toma de datos (mediante formularios, envío de mensajes o uso de redes sociales) o la diferente naturaleza de los promotores de los mapas (ONGs, Universidades, organismos públicos, asociaciones de vecinos o iniciativas ciudadanas) unido a las diferentes tecnologías usadas, hace que exista un abanico complejo de funciones muy diferenciadas entre unos mapas y otros. Así se comprueba que mientras unos mapas ofrecen unos filtros de búsqueda avanzada, teniendo en cuenta valores espaciales, temáticos y/o temporales, otros mapas no ofrecen ningún tipo de filtros. Por otra parte, hay mapas que ofrecen la posibilidad de interactuar con otros usuarios y mapas que no cuentan con ese servicio. O incluso hay casos de portales webs donde el mapa tiene una presencia secundaria y cuesta encontrarlo y acceder a los datos desde la misma página del proyecto.

Esta revisión de experiencias, por tanto, pone de manifiesto la necesidad de seguir trabajando en soluciones tecnológicas que favorezcan la compartición, visualización, consulta y reutilización de datos de estos proyectos colaborativos. Sin embargo, la solución es difícil que surja de una forma horizontal, si no que se necesita también un mayor impulso institucional. Se trata de establecer unos estándares mínimos asequibles para todo tipo de promotores, junto con herramientas accesibles y perdurables. Apostar por soluciones de código abierto es la única vía para que en el futuro se pueda disponer de mapas colaborativos universales, estandarizados, interoperables, amigables y con un desarrollo asequible.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el contexto del proyecto "Infraestructuras científicas para la vigilancia y adaptación al cambio global en Andalucía (INDALO)", cofinanciado al 80% por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), Programa Operativo Plurirregional de España (POPE) 2014-2020. Los autores agradecen a Pilar Díaz Cuevas y David Sampedro Sánchez la participación en la discusión de los resultados y revisión del texto, y a Claudio Lilliu la contribución en la revisión de los contenidos.

5. BIBLIOGRAFÍA

Budhathoki, N. R., Bruce, B., y Nedovic-Budic, Z. (2008). Reconceptualizing the role of the user of spatial data infrastructure. *GeoJournal*, 72(3–4), 149–160. https://doi.org/10.1007/s10708-008-9189-x

Craglia, M. (2007). Volunteered Geographic Information and Spatial Data Infrastructures: when do parallel lines converge? *Position Paper for VGI Specialist Meeting, December, 3*.

Demetriou, D., Campagna, M., Racetin, I., y Konecny, M. (2017). A discussion for integrating INSPIRE with volunteered geographic information (VGI) and the vision for a global spatial-based platform. In G. Papadavid, D. G. Hadjimitsis, S. Michaelides, V. Ambrosia, K. Themistocleous, y G. Schreier (Eds.), *Fifth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2017)* (Issue September 2017, p. 3). SPIE. https://doi.org/10.1117/12.2277194

Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), 211–221. https://doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y

Laconi, C., Pedregal, B., y del Moral, L. (2018). La Cartografía Colaborativa Para Un Cambio Social. Análisis De Experiencias. *Tecnologías de La Información Geográfica: Perspectivas Multidisciplinares En La Sociedad Del Conocimiento*, June, 821-830 SRC-BaiduScholar FG-0.

Mateos, P. (2013). Geovisualización de la población: nuevas tendencias en la web social. *Investigaciones Geográficas*, 60, 87. https://doi.org/10.14198/ingeo2013.60.05

Mcdougall, K. (2009). Volunteered Geographic Information for building SDI. *Proceedings of the Surveying y Spatial Sciences Institute Biennial International Conference, June*, 645–653.

Ojeda Zújar, J., Díaz Cuevas, P., Alvarez-Francoso, J. I., Pérez Alcántara, J. P., y Prieto Campos, A. (2015). Geoportales y geovisores web: Un nuevo entorno colaborativo para la producción, acceso y difusión de la información geográfica. *Análisis Espacial y Representación Geográfica: Innovación y Aplicación*, 777–786.

Olteanu-Raimond, A.-M., Laakso, M., Antoniou, V., Fonte, C., Fonseca, A., Grus, M., Harding, J., Kellenberger, T., Minghini, M., y Skopeliti, A. (2017). VGI in National Mapping Agencies: Experiences and Recommendations. *Mapping and the Citizen Sensor* (pp. 299–326). Ubiquity Press. https://doi.org/10.5334/bbf.m

Sui, D., Elwood, S., y Goodchild, M. (2013). Crowdsourcing Geographic Knowledge. In D. Sui, S. Elwood, y M. Goodchild (Eds.), *Crowdsourcing Geographic Knowledge: Volunteered Geographic Information (VGI) in Theory and Practice* (Vol. 9789400745, Issue Elwood 2008). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4587-2

Vahidnia, M. H., y Vahidi, H. (2021). Open Community-Based Crowdsourcing Geoportal for Earth Observation Products: A Model Design and Prototype Implementation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(1), 24. https://doi.org/10.3390/ijgi10010024

Aplicaciones y desarrollos basados en TIG (SIG, teledetección, cartografía y otras geotecnologías)

TIG y medio ambiente: evaluación ambiental, riesgos, planificación física, ordenación del territorio…



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 193-198

Evaluación de MDE por medio de parches de control

F.J. Ariza-López[1], J. Rodríguez Avi[2], J.F. Reinoso Gordo[3], A.T. Mozas Calvache[1], J.J. Ruiz Lendínez[1], J.L. García Balboa[1]

[1] *Universidad de Jaén, Dpto. Ing. Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Paraje de las Lagunillas S/N, 23071 Jaén.*
[2] *Universidad de Jaén, Dpto. Estadística e Investigación Operativa, Paraje de las Lagunillas S/N, 23071 Jaén.*
[3] *Universidad de Granada, Dpto. Dpto. Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería, Campus Universitario de Fuentenueva (Edificio Politécnico) 18071 Granada.*

fjariza@ujaen.es

RESUMEN: La evaluación de un modelo digital de elevaciones (MDE) frente a una referencia suele realizarse convencionalmente por medio de puntos de control. El objetivo de este trabajo es proponer la utilización de "parches" para la evaluación de MDE. Un parche es un conjunto de puntos que conforman un elemento de control conexo y que representa adecuadamente las elevaciones, pero que también permite derivar pendientes y orientaciones a partir de las elevaciones registradas. La utilización de parches para la comparación (evaluación) de MDE presenta el interés de poder abarcar otras variables como la pendiente y la orientación, pero presenta el inconveniente de la falta de directrices para establecer su tamaño, el número de parches (tamaño de muestra), y de cómo proceder con su tratamiento estadístico. Por medio de simulación, en este trabajo se analiza el comportamiento de esta nueva forma de trabajo considerando el tamaño de los parches (p.ej. 3x3, 5x5, 9x9), el número de parches (p.ej. 20, 50, 100) y los resultados del percentil del 95%. Como patrón de comparación se utilizará el control por medio de puntos basado en un muestreo aleatorio simple. Para el ajuste de la metodología se trabaja con datos reales procedentes de dos productos del Instituto Geográfico Nacional, correspondientes a una zona de Navarra. Los primeros resultados nos indican que el trabajar con parches presenta una cierta ventaja en cuanto al tamaño de muestra cuando se analizan variables como la pendiente y la orientación. En cuanto a la ejecución material de esta metodología en campo, el trabajo ofrece directrices y ejemplos de cómo abordarla.

Palabras-clave: modelo digital de elevaciones, MDE, calidad, control por parches, pendiente, orientación.

1. INTRODUCCION

Los modelos digitales de elevaciones del terreno (MDE) son una tipología de dato geoespacial que tiene gran importancia por el amplio número de aplicaciones en la ingeniería, medio ambiente y sociedad (p.ej. diseño de obras hidráulicas, erosión, incendios, etc.). Por su importancia, los MDE están incluidos en los temas de Inspire, y también de los temas de datos geoespaciales fundamentales globales definidos por el comité de expertos de las Naciones Unidas para la gestión de la información geopespacial global (UN-GGIM, 2019). Según este grupo de expertos, los MDE tienen un rol significativo sobre los objetivos 1,2,3,6,7,11,13, 14 y 15 de desarrollo sostenible.

Como consecuencia de lo anterior, la calidad de los MDE, la posibilidad de compararlos, es un tema importante en la agenda de la calidad de datos geoespaciales, especialmente sobre aquellos conjuntos de datos de carácter global. En esta línea se puede destacar el proyecto *Digital Elevation Model Intercomparison eXperiment* (DEMIX) que, entre sus objetivos tiene evaluar los MDE de aplicación global (Strobl y col., 2021). Trabajos recientes, como los de Polidori y El Hage (2020) y Mesa-Mingorance y Ariza-López (2020) realizan una revisión de cómo se evalúa la calidad de los MDE. De estos trabajos se concluye que mayoritariamente los procesos de evaluación se centran en la exactitud posicional altimétrica, y que se basan en resultados obtenidos por medio de puntos de control. El centrarse casi en exclusiva en la exactitud posicional supone una limitación sobre lo que supone la calidad de un conjunto de datos geoespacial, pues los datos MDE ofrecen una perspectiva mucho más amplia a nada que se consideren casos de uso (p.ej. cuencas hidrográficas, redes de drenaje, etc.). Por otra parte, el que la evaluación se realiza sobre punto de control supone un problema dado que la mayor parte de los conjuntos de datos MDE que se utilizan son de tipo ráster (Ariza-

López y col., 2018). En estos casos no existen puntos fácilmente identificables y bien definidos, que es el requisito usual para establecer puntos de control posicional (FGDC, 1998). Si bien esta circunstancia es ampliamente reconocida, lo cierto es que, aunque se han propuesto otras alternativas (p.ej. basadas en perfiles), no tenemos constancia de trabajos de evaluación o control en los que se hayan utilizado superficies como muestras en de control.

El objetivo de este trabajo es proponer una nueva manera de evaluar los MDE que se base en el uso de "parches", donde un parche es un conjunto de puntos que conforman un elemento de control conexo que puede entenderse como una superficie. Consideramos que esta alternativa presenta una mayor proximidad conceptual al tipo de dato que se desea evaluar y que, en la actualidad, su obtención en campo está facilitada por medio herramientas como el láser escáner terrestre, sensores LiDAR sobre drones, etc. Por tanto, el objetivo del trabajo se centra en analizar aspectos relevantes como son el tamaño de los parches, el número de parches.

El documento se organiza de la siguiente manera, tras esta introducción, primeramente, se presenta el método y los conjuntos de datos utilizados en el análisis, posteriormente, se mostrarán, comentarán y discutirán los resultados. Finalmente, se incluye una breve discusión.

2. MÉTODO Y MATERIAL

2.1. Método

Se utiliza la simulación como herramienta para evaluar la nueva perspectiva que se propone. La simulación es una técnica bien conocida y consolidada, que ha sido utilizada en múltiples ramas de la ciencia y de la tecnología. La simulación está íntimamente relacionada a la idea de replicar el comportamiento de un fenómeno o sistema. Se puede indicar que, la simulación es la construcción de un programa de ordenador que, describiendo el comportamiento de un sistema mediante un modelo, permite obtener conclusiones de valor para apoyar la toma de decisiones (Ríos & Ríos, 1997). En nuestro caso, la simulación deberá imitar un proceso de evaluación de la exactitud posicional, pero dado que se trabaja con parches, también permitirá analizar otras variables como la pendiente y la orientación, si bien se podría extender a cualquier derivada de la elevación (p.ej. curvaturas, etc.).

Se va a trabajar con datos MDE reales. De esta forma, la simulación consistirá en la generación de muestras aleatorias simples de parches sobre dicho conjunto de datos. Además de jugar con las posiciones, la simulación permite jugar con el tamaño de muestra, el tamaño de los parches bajo consideración, la forma de los parches, etc. El proceso se iterará un cierto número de veces (100 veces) para poder obtener resultados con cierta representatividad estadística. En este trabajo se consideran parches de tamaños 3x3, 5x5 y 9x9, los tamaños de muestra considerados son 20, 50 y 100. Como datos de referencia se utilizarán los valores correspondientes a los centroides de los parches, que conforman un conjunto de puntos según un muestreo aleatorio simple. De esta forma, se dispone de un marco estándar con el que comparar los resultados de la aplicación de los parches. Disponer de un muestreo por puntos como referencia permitirá conocer si los parches ofrecen alguna ventaja competitiva respecto al tamaño de muestra.

Para cada simulación, el conjunto generado por los valores de todas las posiciones del producto y de la referencia que pertenecen a los parches conforman la muestra bajo análisis. Dado que se trata de una simulación y en este caso se dispone de la población (la totalidad de los datos del MDE), las muestras así obtenidas se compararán con sus poblaciones por medio de la distancia frecuencial (equivalente al estadístico del test de Kolmogorov-Smirnov). De manera empírica se determinará la distancia correspondiente al percentil del 95% y, a partir de ella, por medio de la ecuación (1) que, para el caso general, relaciona la distancia crítica con el tamaño de muestra, se determinará el tamaño de muestra equivalente despejando la variable tamaño de muestra en función de la distancia crítica.

$$D_{crítica(95\%)} = 1.358 / \left[\sqrt{TamañoMuestra} + 0.12 + 0.11/\sqrt{TamañoMuestra}\right] \quad (1)$$

2.2. Material

Para materializar el proceso descrito en la sección anterior se ha trabajado con dos conjuntos de datos procedentes del Instituto Geográfico Nacional (www.ign.es), correspondientes a la hoja del MTN 1072 (Allo, Navarra) (ver Figura 1). Se trata de una zona de media montaña de unos 500 km2 donde la elevación varía en el intervalo [316, 1046] m, con un valor medio de 468 m y una desviación de 92.8 m. La mayor extensión está dominada por terrenos de labor, que se corresponden con las zonas más llanas y onduladas. En ellas son el cereal, el olivo y la vid las plantaciones predominantes. En las sierras más altas existe bosque mediterráneo

y pinares. Los conjuntos de datos utilizados son:

- MDE02. Modelo de malla, de resolución 2x2 m correspondiente a la hoja MTN1072. Su fuente de datos es el vuelo LiDAR de 2017 (2ª cobertura LiDAR del proyecto PNOA https://pnoa.ign.es/estado-del-proyecto-lidar/segunda-cobertura). Las exactitudes que se informan en los metadatos son $RMSE_{XY} \leq 50$ cm y $RMSE_Z \leq 25$ cm.
- MDE05. Modelo de malla, de resolución 5x5 m correspondiente a la hoja MTN1072. Su fuente de datos es el vuelo LiDAR de 2012 (1ª cobertura LiDAR del proyecto PNOA https://pnoa.ign.es/estado-del-proyecto-lidar/primera-cobertura). Las exactitudes que se informan en los metadatos son $RMSE_{XY} \leq 50$ cm and $RMSE_Z \leq 50$ cm.

Conviene incidir que se trata de dos productos MDE, y no de los datos originales procedentes de las fuentes de captura. El productor, el IGN en este caso, ha sometido los datos primarios a ciertos procesos (filtrados, interpolación, etc.) para la generación de los productos MDE generando las estructuras de malla a 5x5 m y a 2x2 m, de cada uno de los productos aquí utilizados. Se propone la utilización de dos MDE de resoluciones distintas para analizar si el resultado es consistente entre ellas.

Para el caso de las pendientes y orientaciones, éstas se han derivado por medio de las herramientas que para tal fin dispone el programa ArcGIS ™ con los parámetros "por defecto" que se ofrecen. En ambos conjuntos de datos se reiterará el proceso.

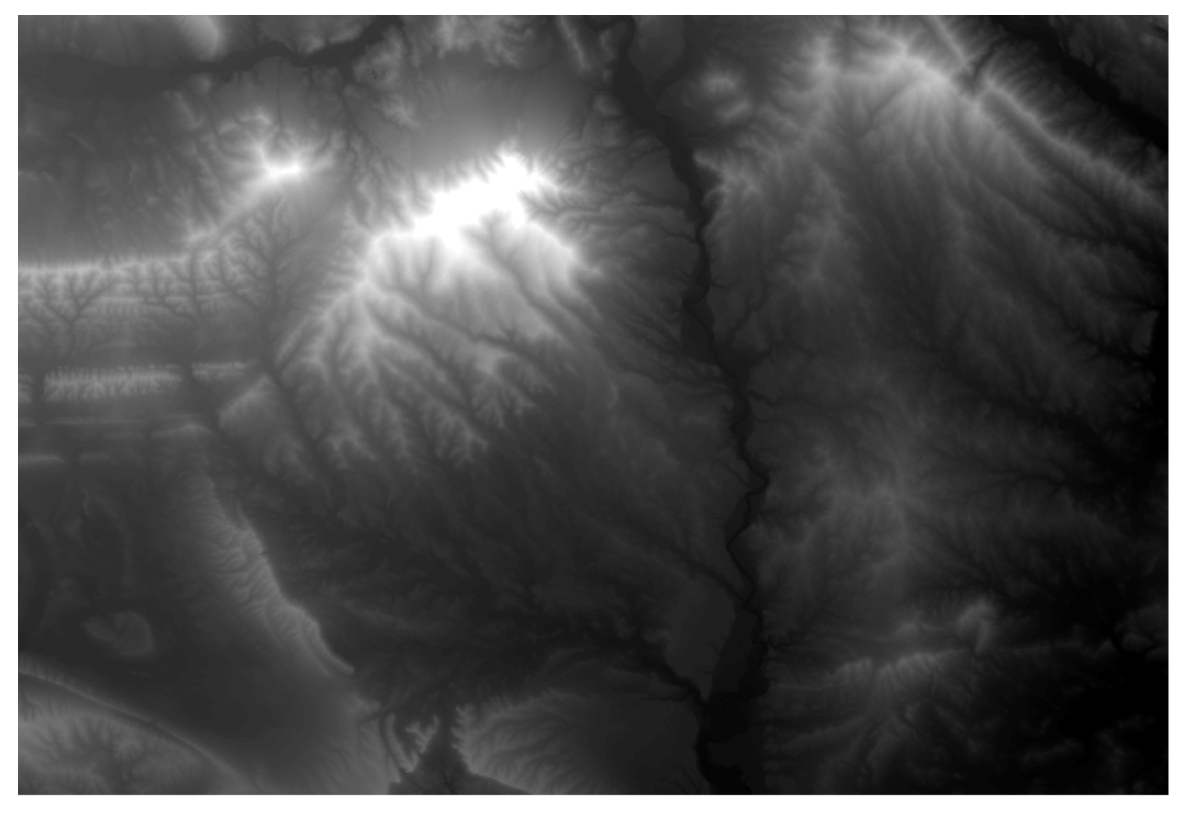


Figura 1. MDE de la zona de trabajo (hoja 1072 del MTN).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos para las cien simulaciones con los dos conjuntos de datos MDE son los que se presentan en la Tabla 1. En ella se recogen los resultados para las variables elevación, pendiente, orientación y error altimétrico. Para cada una de estas variables, y para cada uno de los tamaños de parche y tamaño de muestra de parches, se indican los valores experimentales de las distancias frecuenciales para el percentil del 95% ($D_{95\%}$). Para estas distancias frecuenciales se ha determinado el tamaño de muestra equivalente, n_1 para el caso de los parches y n_2 para el caso de los centroides. Se ha calculado la ratio n_1/n_2 como forma de medir la eficiencia del muestreo por parches respecto al muestreo basado en puntos (centroides). Si este valor es menor que la unidad significa que el muestro por parches es menos eficiente que el muestreo basado en puntos, pero si es mayor que la unidad que es más eficiente.

Tabla 1. Resultados de la simulación de muestras de parches y de centroides

			MDE02					MDE05				
			Parches		Centroides		Ratio n1/n2	Parches		Centroides		Ratio n_1/n_2
	Tamaño Parche	Número parches	$D_{95\%}$	n_1	$D_{95\%}$	n_2		$D_{95\%}$	n_1	$D_{95\%}$	n_2	
Elevación	3x3	20	0,2841	21	0,2858	21	0,99	0,2873	22	0,2850	22	0,98
		50	0,1863	51	0,1877	50	0,99	0,1855	54	0,1948	49	1,11
		100	0,1330	102	0,1352	98	0,98	0,1401	95	0,1422	92	1,03
	5x5	20	0,2832	22	0,2850	21	0,99	0,2902	21	0,2768	24	0,91
		50	0,1881	50	0,1885	50	0,99	0,1799	57	0,1912	51	1,13
		100	0,1325	102	0,1359	97	0,97	0,1352	102	0,1362	101	1,01
	9x9	20	0,2953	20	0,3012	19	0,98	0,2956	21	0,3140	18	1,13
		50	0,1927	48	0,1979	45	0,97	0,2055	44	0,2046	44	0,99
		100	0,1350	99	0,1392	93	0,97	0,1417	93	0,1403	95	0,98
Pendiente	3x3	20	0,2581	26	0,3023	19	1,37	0,2592	27	0,3049	19	1,40
		50	0,1630	67	0,1859	51	1,31	0,1656	68	0,1938	49	1,38
		100	0,1113	146	0,1291	108	1,35	0,1192	132	0,1301	111	1,19
	5x5	20	0,2409	30	0,3065	18	1,67	0,2419	31	0,3103	19	1,67
		50	0,1515	78	0,1900	49	1,59	0,1553	77	0,1906	51	1,52
		100	0,1062	160	0,1342	100	1,60	0,1068	165	0,1362	101	1,64
	9x9	20	0,2169	37	0,2935	20	1,85	0,2189	38	0,2990	20	1,90
		50	0,1417	89	0,1940	47	1,89	0,1472	86	0,1944	49	1,76
		100	0,1018	174	0,1328	102	1,71	0,1022	180	0,1421	92	1,95
Orientación	3x3	20	0,2617	25	0,3004	19	1,31	0,2710	25	0,2998	20	1,23
		50	0,1667	64	0,1930	48	1,33	0,1660	67	0,1970	48	1,42
		100	0,1155	135	0,1326	102	1,32	0,1195	131	0,1366	100	1,31
	5x5	20	0,2402	30	0,2927	20	1,50	0,2442	31	0,2923	21	1,45
		50	0,1496	80	0,1896	49	1,63	0,1493	84	0,2047	44	1,90
		100	0,1081	155	0,1358	97	1,59	0,1232	123	0,1370	100	1,24
	9x9	20	0,2276	34	0,2990	19	1,79	0,2288	35	0,3120	18	1,90
		50	0,1440	87	0,1850	52	1,67	0,1570	76	0,1858	54	1,41
		100	0,1036	168	0,1377	95	1,77	0,1044	172	0,1357	101	1,70
Error	3x3	20	0,2437	30	0,2931	20	1,50	0,2418	31	0,3001	20	1,56
		50	0,1501	80	0,1824	53	1,51	0,1570	75	0,1939	49	1,54
		100	0,1088	152	0,1333	101	1,50	0,1203	130	0,1351	102	1,26
	5x5	20	0,2256	35	0,2971	20	1,75	0,2273	35	0,2998	20	1,77
		50	0,1419	89	0,1894	49	1,82	0,1446	89	0,1851	54	1,65
		100	0,1098	150	0,1370	96	1,56	0,1055	169	0,1486	84	2,00
	9x9	20	0,2117	39	0,2907	20	1,95	0,2234	37	0,2920	21	1,74
		50	0,1357	98	0,1951	47	2,09	0,1371	99	0,1975	47	2,10
		100	0,0967	194	0,1323	103	1,88	0,0992	192	0,1273	116	1,66

En primer lugar, podemos analizar que, en general, el valor de n_2 es bastante cercano al valor utilizado como número de parches, lo que significa que existe coherencia entre los resultados empíricos y la formulación (ecuación 1) utilizada. Otro aspecto relevante es que salvo para elevación, el resto de variables presentan valores de ratio n_1/n_2 mayores que la unidad. Lo que indica que el muestro por parches es más eficiente que el muestro basado en puntos, amén de que permite calcular variables derivadas (orientación, pendiente, etc.), cosa que no permite el muestreo basado en puntos dado que no ofrece datos en una vecindad para su cálculo. Lo anterior, llevado al caso de la $D_{95\%}$ implica que los valores para el caso de los parches son menores que para el caso de los centroides o puntos (salvo para la elevación). La comparación entre número de parches y tamaño de parches, viene a indicar que el tamaño de los parches tiene mayor relevancia en la eficiencia del proceso. Respecto al comportamiento diferencial entre los dos conjuntos de datos utilizados en el análisis, atendiendo a las ratios n_1/n_2 obtenidos, se observa que son muy similares, con cierta ventaja (mayor valor), para el caso del MDE02.

Con la precaución que debe tenerse dado que la simulación se ha realizado sólo con cien iteraciones, los primeros resultados evidencian la potencialidad de este nuevo enfoque pues es más eficiente y, además, ofrece la posibilidad de trabajar con pendientes y orientaciones y, en general, con cualquier variable derivada (p.ej. curvaturas), aspecto que no es posible cuando se trabaja con puntos.

Las simulaciones se han realizado con parches de forma cuadrada y de tamaños prefijados y siempre con estas mismas características. Ésta es una limitación clara del proceso desarrollado si se compara con lo que podrían ser aplicaciones reales. Sin embargo, consideramos que, dado el carácter inicial y exploratorio de este trabajo, ofrece una aproximación más sencilla y directa. En cualquier caso, una vez determinada la viabilidad del método por medio del proceso de simulación desarrollado, queda por establecer un método de trabajo de campo y, a partir de esta experiencia, analizar qué tamaños y formas deberían considerarse para que el análisis sea más real. En cualquier caso, este aspecto queda fuera del alcance de este trabajo.

La simulación se ha realizado en una única zona con dos conjuntos de datos distintos e independientes. Los resultados son consistentes entre ellos y con lo que cabía esperar, no obstante, realizar estas mismas pruebas en otras zonas y sobre diversas tipologías del terreno, podría ofrecer un conocimiento más profundo del proceso y de sus fortalezas y debilidades.

4. CONCLUSIÓN

La principal conclusión que se ha obtenido es que es viable desarrollar un proceso de control de MDE basado en el uso de parches de control. La aplicación de estos parches ofrece la posibilidad de controlar las elevaciones, pero también otras variables derivadas y, además, ofrece una mayor eficiencia de muestreo frente a lo que sería un muestreo aleatorio simple basado en puntos de control.

El proceso de simulación realizado posee ciertas limitaciones en relación a los tamaños de parches, la forma de los parches, el número de iteraciones, etc., que deben ser superadas en posteriores trabajos. Además, se debe aplicar sobre otras zonas.

Para que esta nueva perspectiva sea aplicable en casos reales, se necesita definir los procesos de trabajo en campo que resulten en datos de tipo parche.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto de investigación "Calidad Funcional en Modelos Digitales de Elevaciones del Terreno en Ingeniería" (https://coello.ujaen.es/investigacion/web_giic/funquality4dem/) de la Agencia Estatal de Investigación. PID2019-106195RB-I00 / AEI / 10.13039/501100011033.

5. BIBLIOGRAFÍA

Ariza-López F.J., Chicaiza Mora E.G., Mesa Mingorance J.L., Cai J., Reinoso-Gordo J.F. (2018). DEMs: An Approach to Users and Uses from the Quality Perspective. *IJSDIR*, Vol 13 (2018). https://ijsdir.sadl.kuleuven.be/index.php/ijsdir/article/view/469

FGDC (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards. Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. Federal Geographic Data Committee, Reston, Virginia. https://www.fgdc.gov/standards/projects/accuracy/part3/chapter3

Mesa-Mingorance, J.L., Ariza-López F.J. (2020). Accuracy Assessment of Digital Elevation Models (DEMs): A Critical Review of Practices of the Past Three Decades. *Remote Sensing* 12, no. 16: 2630. https://doi.org/10.3390/rs12162630

Polidori L., El Hage, M. (2020). "Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review" *Remote Sensing* 12, no. 21: 3522. https://doi.org/10.3390/rs12213522

Ríos D.; Ríos S. (1997). Simulación, Métodos y aplicaciones. Madrid, Ed Ra-Ma.

Strobl, P. A., Bielski, C., Guth, P. L., Grohmann, C. H., Muller, J.-P., López-Vázquez, C., Gesch, D. B., Amatulli, G., Riazanoff, S., and Carabajal, C. (2021). The digital elevation model intercomparison experiment DEMIX, a community-based approach at global dem benchmarking. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci*., XLIII-B4-2021, 395–400, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2021-395-2021.

UN-GGIM (2019). The Global Fundamental Geospatial Data Themes. United Nations Committee of Experts On Global Geospatial Information Management. United Nations, New York.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 199-207

Calidad en modelos digitales de elevaciones: una aproximación funcional

F.J. Ariza-López[1], J.F. Reinoso-Gordo[2], J.L. García-Balboa[1]

[1] *Universidad de Jaén, Dpto. Ing. Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Paraje de las Lagunillas S/N, 23071 Jaén.*
[2] *Universidad de Granada, Dpto. Dpto. Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería, Campus Universitario de Fuentenueva (Edificio Politécnico) 18071 Granada.*

fjariza@ujaen.es

RESUMEN: La calidad de los datos MDE (Modelo Digital de Elevaciones) no siempre es bien entendida por los usuarios. Por lo general, la calidad de los datos geoespaciales es definida, evaluada e informada desde una perspectiva datocéntrica, propia de la calidad intrínseca y de una perspectiva de productor de datos. Sin embargo, el usuario está interesado en la adecuación al uso. Esta última perspectiva es inabordable para los productores de datos (p.ej. los institutos geográficos y cartográficos nacionales), dado que los usuarios, sus necesidades y adecuaciones al uso son tan variadas y numerosas, que convierten este asunto en algo inabordable. Se propone así un nuevo nivel de evaluación que denominamos calidad funcional. Adjetivamos la calidad con el término «funcional» porque lo que se propone es evaluar cómo de bien «funcionan» los datos en casos de uso genéricos. Con casos de uso genéricos nos referimos a los que implican utilizar capacidades SIG, pero sin un contexto de aplicación concreto. Se trata de un nuevo nivel de evaluación e información sobre la calidad que recoge el hecho de que los datos geoespaciales se utilizan en procesos, vinculando datos con algoritmos para considerar de manera más completa la calidad de los resultados, que es lo que afecta más directamente a los usuarios. En este trabajo se justifica la necesidad de esta nueva aproximación y se aplica a al caso práctico consistente en la determinación de una red de drenaje a partir de un MDE.

Palabras-clave: modelo digital de elevaciones MDE, calidad, adecuación al uso, calidad funcional.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de calidad es algo cercano a todos y, en el día a día, utilizando lenguaje coloquial, hablamos continuamente de calidad. La calidad tiene distintas interpretaciones según el punto de vista que se adopte. Para los que trabajan con normas, la calidad es la adecuación a la(s) norma(s) establecida(s) para ese producto o servicio. Para un usuario del común, es que el bien o servicio le aporte una utilidad adecuada a su necesidad, y que satisfaga sus expectativas. Una definición que nos interesa recuperar es la dada por el Diccionario de la lengua española (RAE, 1992) que dice así: «propiedad o conjunto de propiedades inherentes a una cosa, que permiten apreciarla como igual, mejor o peor que las restantes de su especie». Esta definición aclara que la calidad no tiene por qué limitarse a una única propiedad del objeto que se considera, sino que pueden ser varios factores los que entren en juego para definir la calidad. Por otra parte, lo inherente es lo propio o inseparable de las cosas, y aquí cabe matizar que dentro de lo inherente hay factores que son más evidentes, o explícitos, que otros que poseen un carácter más implícito. Otro aspecto de interés de esta definición es el que hace referencia a que la calidad debe ser apreciada y comparada. Esto significa que cada individuo podrá tener una apreciación distinta, por lo que la calidad hay que entenderla como algo subjetivo. Finalmente, la definición indica que se utiliza la comparación para valorarla, y ello significa la necesidad de patrones para comparar, es decir, patrones de medición

Cuando se vincula la calidad a los usuarios se habla de adecuación al uso, por lo que también interesa definir qué significa este término. En ASQ (2022) se indica que la adecuación al uso (*fitness for use*) es un «término que a veces se utiliza para definir el término "calidad", para indicar el grado en que un producto o servicio cumple los requerimientos para el uso previsto». Por tanto, esta perspectiva obliga a tener especificado el uso y a evaluar su adecuación. Ambos aspectos son complejos, como se verá más adelante. Una aproximación al uso puede realizarse por medio de "casos de uso". Un caso de uso se puede definir

como la descripción de una acción, actividad, proceso, etc., que ofrece un resultado a un usuario. La descripción de un caso de uso puede hacerse de una manera más o menos formal por medio de lenguajes (p.ej. UML) y herramientas adecuadas, incluyendo los actores, acciones, entradas, salidas, etc., necesarias para generar el resultado del caso de uso. En este punto interesa traer a colación un ejemplo extraído del sector automovilístico. Pensemos en un vehículo que se corresponde con un modelo concreto de una marca concreta y que nos interesa el aspecto relacionado con el consumo de combustible como un aspecto importante de la "calidad" del vehículo. Aun así, son muchos los posibles usuarios, usos y formas de conducir que se pueden desarrollar sobre este vehículo concreto generando posibles consumos muy distintos unos de otros. En este caso, para informar del consumo se recurre a estándares como el NEDC (*New European Driving Cycle*) (EU, 2007), y más reciente el estándar WLTP (*World Harmonized Light-duty Vehicle Test Procedure*) (EU, 2017). Según la Dirección General de Tráfico del Gobierno de España (DGT, 2020), este último adopta una dinámica de conducción que intenta reproducir mucho mejor cómo conducen las personas en el mundo real. Como conclusión de este caso complejo podemos considerar que, una vez establecido un caso de uso concreto, el análisis de la adecuación del producto a ese caso de uso, aún sin perder complejidad, se simplifica bastante, gracias a las restricciones propias establecidas en el estándar de evaluación del caso de uso considerado. Esta idea es la base del trabajo que se presenta en esta ponencia.

En base a la experiencia del sector del automóvil, nuestro objetivo es desarrollar una nueva perspectiva de la calidad de los datos geoespaciales, que denominamos calidad funcional, tal que sea adecuada para considerar casos de uso concretos. La formalización de esta perspectiva y ofrecer un ejemplo de aplicación forman parte de este objetivo. Para ello, el documento se organiza de la siguiente manera: la sección segunda presenta la propuesta sobre calidad funcional, en la sección tercera se formaliza un caso de uso concreto, la sección cuarta es un ejemplo de aplicación sobre unos datos y algoritmos concretos, la sección quinta realiza una discusión sobre la propuesta y los resultados de la aplicación y la sexta y última sección ofrece unas conclusiones generales.

2. CALIDAD FUNCIONAL

Adjetivamos el sustantivo calidad con el adjetivo funcional pues el objetivo es evaluar cómo de bien "funciona" un conjunto de datos cuando se consideran casos de uso genéricos. Con el término "casos de uso genéricos" nos referimos a aquello que implican utilizar capacidades SIG de análisis, pero sin un contexto de aplicación concreto. Por ejemplo, y centrados en datos de modelo digital de elevaciones (MDE), algunos casos de uso genéricos indicados en la bibliografía son: cálculo de pendientes, cálculo de orientaciones, delineación de redes de drenaje, análisis de visibilidad, determinación de cuencas aportadoras, etc. Estos casos coinciden con capacidades (comandos, herramientas, etc.) SIG de los paquetes más comunes (p.ej. QGIS, ArcGIS, etc.), pero podrían ser otros más complejos, aunque de manera algo simplificada (p.ej. cálculo del hietograma bajo ciertos supuestos). Queremos advertir que, el caso de uso bajo consideración no se completa o complementa con nada, es decir, es genérico; por ejemplo, no se indica cálculo de pendientes «para la determinación de un deslizamiento de ladera», o «para la determinación de la de la erosión potencial», simplemente se focaliza en lo sustancial: la determinación de la pendiente.

El enfoque de calidad funcional de un conjunto de datos se vincula directamente al hecho de que ese conjunto de datos se utiliza en un procesamiento algorítmico cuyo resultado es lo que realmente interesa al usuario del conjunto de datos de entrada. De esta manera, la calidad funcional se define como la consistencia, frente a una referencia, de los resultados generados por un algoritmo determinado al aplicarlo a un conjunto de datos geoespaciales. Así, podemos hablar de la calidad de un conjunto de datos MDE para la determinación de una red de drenaje. Como se puede deducir de lo anterior, el algoritmo juega un papel determinante, y puesto que pueden existir numerosos algoritmos para obtener un mismo resultado (p.ej. para la pendiente ver Tang y Pilesjö, 2011), deberá elegirse adecuadamente el más idóneo. Por su puesto, el algoritmo elegido debe estar directamente relacionado con el caso de uso genérico en el que se va a trabajar.

Por tanto, para conseguir una buena especificación del caso de uso genérico, no sólo se debe indicar explícitamente el algoritmo que se aplica (y herramienta de software, si es necesario), sino también sus parámetros de control, si existen, y ofrecer una referencia válida para su consulta. Un ejemplo será el de un MDE sobre el que se aplique un algoritmo concreto, con determinados valores de sus parámetros de control, que derive una red de drenaje, que se comparará con una red de drenaje de referencia. Para la referencia se deben adoptar las mismas exigencias que en una evaluación de la calidad convencional: representatividad, independencia y mayor exactitud. Si se desea aplicar la calidad funcional para comparar algoritmos sobre un mismo conjunto de datos, no se requiere una referencia y se puede considerar uno de los resultados de los algoritmos como referencia para la comparación.

Junto a todo lo anterior, otro aspecto importante de la calidad funcional es que debe informar sobre aquello que realmente interesa al usuario. Siguiendo con el ejemplo de la determinación de la red de drenaje, algunos aspectos que pueden ayudar a informar sobre la calidad funcional del MDE son: el desplazamiento de la red resultante, la compleción de la red obtenida, los problemas topológicos presentes, etc. Es decir, aspectos que pueden interesar a un usuario que utilizará esa red de drenaje en sus procesos de producción o toma de decisiones. Como conclusión de lo que significa la calidad funcional, podemos indicar:

- Es una aproximación a la adecuación al uso. Consideramos que es una aproximación dado que el caso de uso en que está centrada es considerado como genérico y, por tanto, no estará definido por exigencias particulares de unos usuarios u otros (p.ej. para un proyecto de ingeniería las exigencias de resolución son distintas para las fases de estudio de viabilidad, anteproyecto y proyecto).
- Es la capa intermedia de un sistema de tres capas, cada una de las cuales nos acerca a la calidad desde una perspectiva distinta. La Figura 2 presenta un resumen de esta idea, donde la calidad funcional es la capa intermedia (capa 2) entre la evaluación tradicional (capa 1) realizada por el productor con parámetros casi exclusivamente de exactitud posicional (Mesa-Mingorance y Ariza-López, 2020), y la adecuación al uso propia de un usuario con unos condicionantes concretos para su aplicación (capa 3). De esta forma, se evita el problema de los incontables usuarios y condiciones concretas de sus aplicaciones, lo que supone un contexto demasiado rico y amplio como para poder ser abordado. En el fondo, estamos siguiendo el mismo esquema que se ha mencionado en el apartado 1 para el caso del sector automovilístico respecto a la información del consumo de los vehículos.

Bajo este sistema, son los productores de datos geoespaciales los que deberían hacerse cargo de la evaluación de la calidad funcional, lo mismo que en el sector del automóvil son los fabricantes de coches los que informan del consumo de sus modelos.

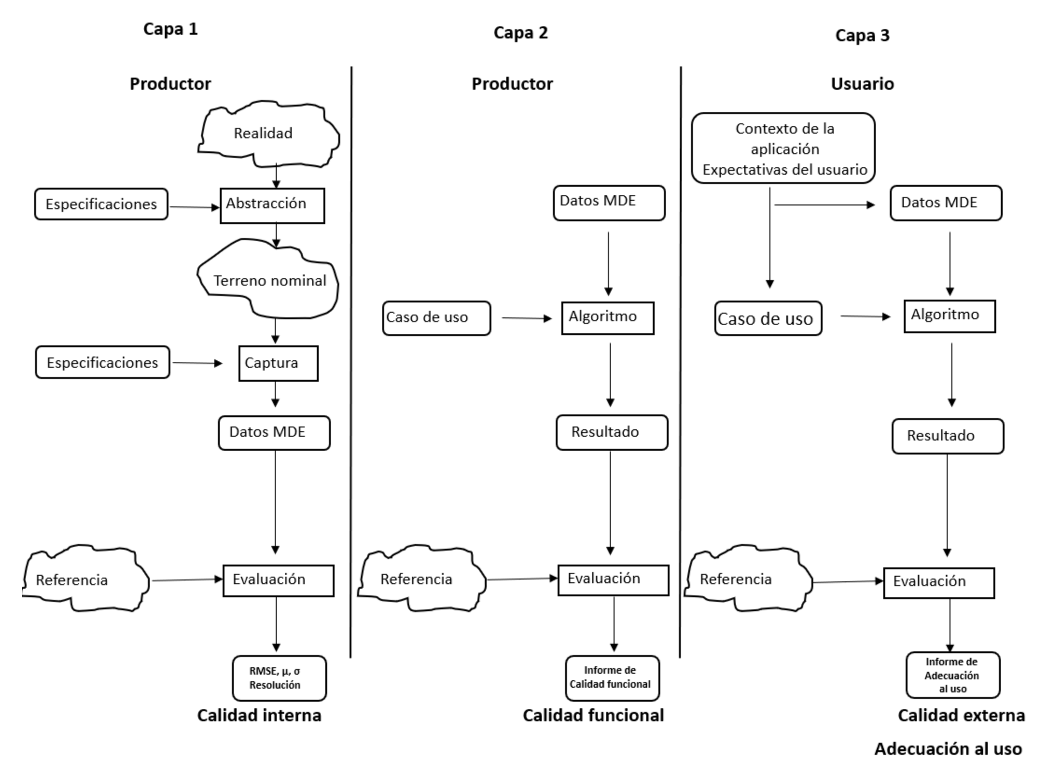


Figura 1. Modelo de tres capas relativo a la calidad de datos geoespaciales.

3. FORMALIZACIÓN DE LA CALIDAD FUNCIONAL EN LA DETERMINACIÓN DE CUENCAS

En este apartado se desarrolla un caso de aplicación que ejemplifica la aplicación de la calidad funcional. Se considera el caso de uso relativo a la determinación de cuencas hidrográficas. Este caso de uso es muy relevante dado que las cuencas hidrográficas son un elemento clave de la gestión del agua, el territorio, la biota, etc. por medio de las aplicaciones que las cuencas tienen en ingeniería civil, agronómica, forestal, ciencias ambientales, ecología, etc. Indudablemente, cada una de estas aplicaciones tiene características y matices específicos, por ejemplo, no es lo mismo la delimitación de una cuenca con un

objetivo de delimitación administrativa o jurídica, que para un estudio de calidad del agua que se vierte en un embalse. A lo anterior habría que añadir los condicionantes propios de la escala de trabajo y otros aspectos propios del usuario para poder aproximar la adecuación al uso. Sin embargo, la propuesta de analizar la calidad funcional se desprende de estos últimos matices y se centra en unos datos concretos y un caso de uso vinculado a un algoritmo concreto.

Dada la relevancia del caso de uso para el desarrollo de la calidad funcional, lo primero que ha de hacerse es establecer el caso de uso y vincularlo con un algoritmo de procesado. Basado en la propuesta de Reinoso-Gordo (2020) para casos de uso, en la Tabla 1 se define el caso de uso considerado en este ejemplo de manera simplificada. Puesto que la calidad funcional hay que evaluarla, también se requiere establecer las características de calidad que son de interés, y las medidas que se aplican, el método de evaluación y la referencia a utilizar en la evaluación (patrón de comparación). Las características de interés deben derivarse de la voz del usuario y ser relevantes para el caso de uso pretendido, así como poder ser evaluadas por medio de medidas cuantitativas. Consideramos que la mejor manera de establecer las características relevantes es por medio de consulta a los usuarios. La conversión de las características en una o varias medidas es otro proceso necesario. En este caso, las medidas propuestas se basan en la revisión de algunos trabajos aplicados sobre determinación de cuencas utilizando MDE, de tal manera que ya se trata de medidas utilizadas por técnicos e investigadores (referencias), lo que entendemos que conlleva un valor suficiente de adecuación al uso.

Tabla 1. Esquema para la especificación de la calidad funcional

Detalles del caso de uso		
Nombre	Determinación de la cuenca hidrográfica	
Resumen	El usuario desea generar una cuenca o conjunto de subcuencas hidrográficas a partir de un conjunto de datos MDE y un algoritmo de cálculo determinado.	
Forma de uso	El resultado del procesamiento es un recinto(s) poligonal que se utiliza(n) para establecer zonas de interés o análisis.	
Características de adecuación al uso del producto	Fidelidad del resultado considerada a partir de las siguientes medidas: ● Exactitud en las posiciones de los perímetros (función de distribución y percentil 95%). ● Exactitud en las áreas las cuencas (media y desviación). ● Porcentaje medio de superposición (media y desviación).	
Procesado de los datos de entrada		
Determinación de cuencas y subcuencas hidrográficas	Descripción	Se aplica r.watershed de GRASS (https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.watershed.html) directamente sobre los datos MDE.
Indicación de los parámetros involucrados.	Descripción	Los parámetros considerados son: ● Factor de convergencia para MFD: 5 (defecto) ● Tamaño mínimo de cuenca exterior: 400 hectáreas
Detalles del conjunto de datos de salida		
Conjunto de cuencas y subcuencas	Descripción	Se devuelve como salida un conjunto de polígonos adyacentes que rellenan todo el espacio del MDE.
	Modelo de datos	Vectorial (r.to.vec https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.to.vect.html) sin aplicar suavizado.

El caso de uso se presenta en la Tabla 1, la cual ofrece un resumen del caso de uso, de la forma de uso de los datos resultantes, la indicación de las medidas, del algoritmo y parámetros utilizados y algún detalle sobre los datos resultantes. Por otra parte, el método de evaluación debe estar fijado y ser de público conocimiento, facilitándose además toda esta información a los usuarios. El método de evaluación se presenta en la Tabla 2. En esta tabla se realiza una breve descripción del método, de la población y muestra y de las medidas que se aplican para cada aspecto de la calidad. La formalización completa del método y de las medidas debe hacerse utilizando el marco propuesto por ISO 19157 (ISO 2013), pero queda fuera del alcance de este trabajo, no obstante, un ejemplo completo siguiendo el marco ISO 19157 puede encontrarse en Ariza-López y col. (2022).

Tabla 2. Métodos de evaluación

Nombre	Exactitud en las posiciones 2D de los perímetros de las cuencas.	Exactitud en las áreas 2D de las cuencas.	Porcentaje medio del grado de superposición de las cuencas 2D.
Tipo ISO	Directo externo.	Directo externo.	Directo externo.
Tipo de resultado	Evaluación.	Evaluación.	Evaluación.
Propósito	Evaluar la exactitud posicional 2D de los perímetros de las cuencas.	Evaluar la exactitud de las áreas de las cuencas.	Evaluar el grado de superposición espacial de las cuencas.
Descripción	El método consiste en aplicar el método del orlado simple (Goodchild y Hunter, 1997). para determinar la función de distribución de las discrepancias de los perímetros entre elementos homólogos del conjunto de datos a evaluar y la referencia.	El método consiste en calcular los estadísticos media y desviación para las discrepancias en el valor de las áreas entre elementos homólogos del conjunto de datos a evaluar y la referencia.	El método consiste en determinar el grado de solape que existe entre las áreas correspondientes a cuencas homólogas en el producto y en la referencia. Se utiliza una relación m:n para establecer la relación entre objetos. Las cuencas se asignan por criterio de mayoría de área.
Descripción (detalle)	● Población: Todos los perímetros del conjunto de resultados. ● Muestra: Todos los perímetros resultados.	● Población: Todas las cuencas resultados. ● Muestra: Todas las ciencias resultados.	● Población: Todas las cuencas resultados. ● Muestra: Todas las cuencas resultados.
Recursos	● Instrumental. Herramienta informática (p.ej. SIG) con capacidad de cálculo de orlado incremental.	● Instrumental. Herramienta informática (p.ej. SIG) con capacidad de cálculo de superficies de elementos poligonales.	● Instrumental. Herramienta informática (p.ej. SIG) con capacidad de cálculo superposición entre polígonos vectoriales.
Medidas	Anchura de orlado correspondiente al 95% de la longitud.	Media o sesgo de la medida de área Desviación de la medida de área	Media del porcentaje de acuerdo. Desviación del porcentaje de acuerdo
Resultados	Se informa directamente indicando el valor que resulta para la medida.	Se informa directamente indicando el valor que resulta para la medida.	Se informa directamente indicando el valor que resulta para la medida.

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN: CALIDAD FUNCIONAL DE UN MDE EN LA DETERMINACIÓN DE CUENCAS

Como se ha indicado previamente, la calidad funcional puede ser aplicada para comparar resultados de procesamientos algorítmicos o resultados de procesamientos algorítmicos frente a una referencia. Dado que no se dispone de una referencia válida, se aplicará al primer caso. En este caso se propone evaluar el comportamiento de la determinación de las cuencas por medio de las opciones MFD (*multiple flow direction*) y SFD (*single Flow direction*, que equivale al D8). En relación a los datos, se utilizará un MDE procedente de la fuente STRM para una cuenca de unas 1300 hectáreas situada en la hoja MTN 1072 (Allo, Navarra) (Figura 2). Los datos STRM se han utilizado tal y como proceden de su descarga, sin aplicar algoritmos de relleno de

pozos o cualesquiera otro usuales antes aplicar un procedimiento SIG de determinación de cuencas hidrográficas. Con ello se pretende no introducir decisiones extrañas sobre los datos que ofrece el productor.

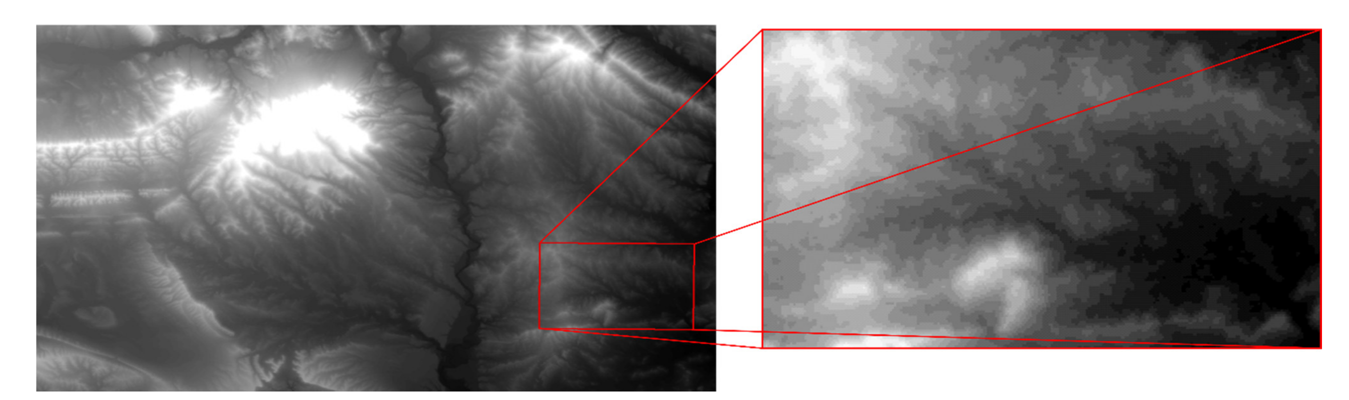


Figura 2. Modelo digital de elevaciones correspondiente a la hoja MTN1072 (Allo, Navarra) y zona de análisis.

Se ha aplicado r.watershed con las opciones de cálculo por medio de los algoritmos SFD y MFD y con parámetro de tamaño mínimo de cuenca exterior de 400 hectáreas, para ambos casos, y factor de convergencia para MFD igual a cinco (valor por defecto). Los resultados son los que se presentan en la Figura 3. En rojo se presentan las cuencas generadas por el algoritmo MFD y en azul las generadas por el algoritmo SFD. El grado de semejanza visual entre ambos resultados es grande. Además, el grado de relación 1:1 es predominante, salvo para el caso de la cuenca de la esquina superior derecha que aparece con tres subcuencas en el resultado del MFD.

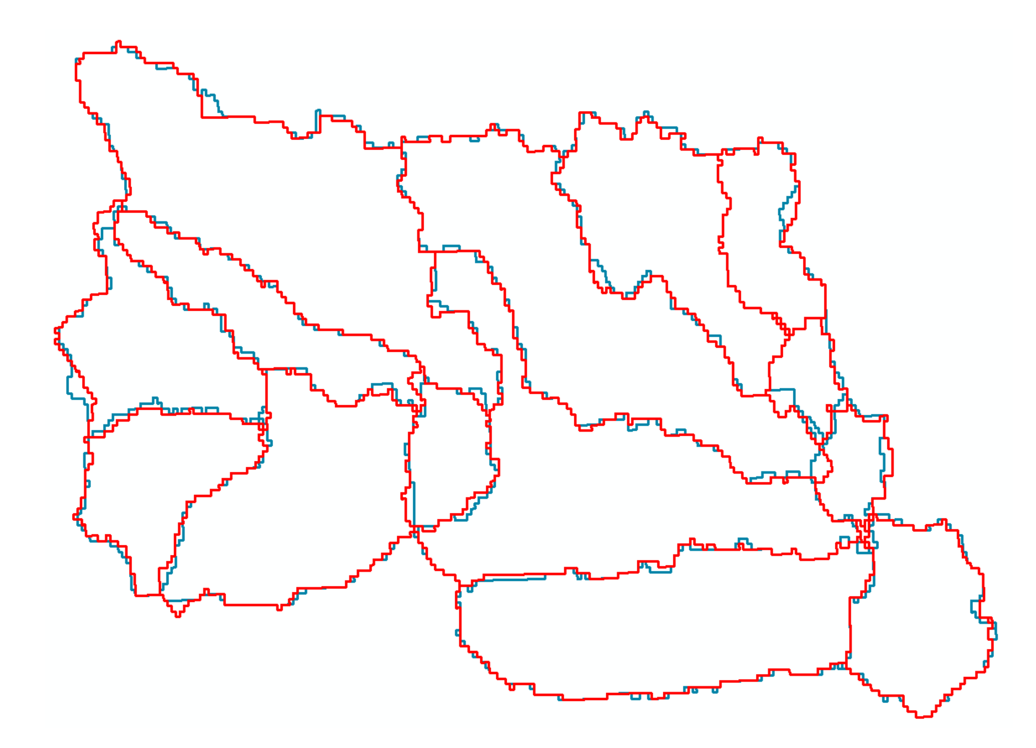


Figura 3. Cuencas hidrográficas resultantes del algoritmo MFD (rojo) y SFD (azul) de r.watershed de GRASS.

En relación a las medidas que se indicaron en la Tabla 2 los resultados numéricos se presentan en la Tabla 3. La Figura 4 muestra la evolución del porcentaje de inclusión de los perímetros en función de la distancia de orlado. Estos resultados indican que la exactitud posicional de los perímetros está en el orden de 40 m para el caso del 95% de inclusión. Ya en relación a las superficies medidas para el conjunto de cuencas, existe un sesgo en superficie de carácter positivo lo que viene a indicar que las cuencas generadas por el SFD son algo más grandes (alrededor de 1000 m2) que las generadas por el MFD; la desviación en esta

medida está en el orden de 2,29 hectáreas. En relación al grado de superposición es bastante elevado (95,54%) y la desviación de esta cantidad está en el orden de un tres por ciento. Estos resultados numéricos son consistentes con la impresión visual que se obtiene de la Figura 3, en la que se observan que los perímetros se superponen bastante, que las formas de las cuencas son muy similares, y que el nivel de solape o superposición entre ellas es muy alto.

Tabla 3. Resultados de las medidas

Aspecto	Medida	Resultado
Exactitud posicional 2D de los perímetros de las cuencas	Anchura orlado correspondiente al 95%	40 m
Exactitud de las áreas de las cuencas	Media del sesgo en superficie (ha)	0,0996
	Desviación en superficie (ha)	2,29
Grado de superposición espacial de las cuencas	Media del acuerdo en superficie (%)	95,54
	Desviación en porcentaje de acuerdo en superficie (%)	0,033

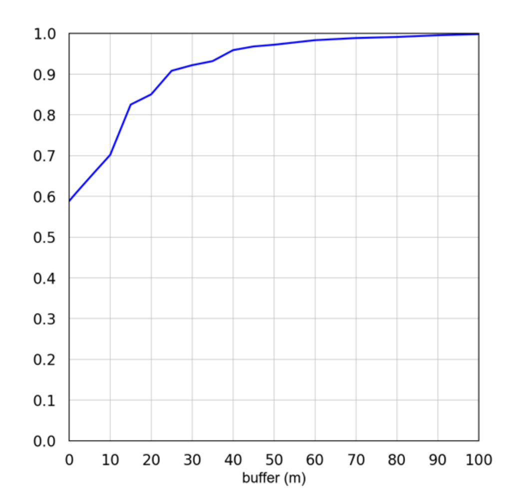


Figura 4. Evolución del porcentaje de inclusión de los perímetros en función del ancho de búffer.

La conclusión a la que nos llevan estos resultados es que, para los datos analizados, las opciones MFD y SFD de r.watershed funcionan de una manera bastante similar.

5. DISCUSIÓN

La discusión se debe orientar alrededor de dos líneas, por un lado, la calidad funcional y por otro su aplicación. Respecto a la calidad funcional, consideramos que antes de adoptar una nueva perspectiva conviene pensar si aporta o no ventajas respecto al estado anterior. A nuestro modo de ver, las ventajas de trabajar con la calidad funcional son varias. La calidad funcional liga los datos a la esencia de los procesos (algoritmos) y a casos de uso aplicados. Todo ello posee una visión y vocación más aplicada que la calidad interna informada por los productores, que es mucho más datocéntrica (el propio dato, sin considerar su uso). Al quedar la calidad funcional ligada a casos de uso por medio de algoritmos, la calidad funcional elimina la incertidumbre derivada del manejo de procesos de cálculo dispares y por ello se refiere al par {conjunto de datos dado, algoritmo}. Sin embargo, la calidad funcional no entra en el rico contexto de la aplicación de cada usuario, por lo que no es del todo equivalente a la adecuación al uso, ofreciendo un estado intermedio entre los índices de calidad tradicionales de los MDE, y lo inabordable de evaluar la calidad para todos los contextos de usuarios. Esto permite que sí pueda ser incluida en las evaluaciones realizadas por los productores y, por tanto, sea informada en los metadatos para que los usuarios tengan una mejor apreciación de la calidad de los conjuntos de datos que se les ofrecen.

Otro aspecto importante relativo a la calidad funcional es cómo se ha definido en este ejemplo por medio de varias características de adecuación al uso del producto. El número de estas características y las medidas a aplicar es un campo abierto. Por ejemplo, después de la aplicación realizada, consideramos que también puede ser de interés tomar en consideración un aspecto no deseable como es la presencia de

microcuencas que ocupan apenas unas pocas celdillas del MDE. Consideramos que no es posible determinar cuántas características de adecuación al uso y medidas se deben considerar, es algo que deberá estar alineado con un mejor conocimiento de las necesidades del usuario y que debe centrarse es los aspectos más críticos, pues de lo contrario, el uso de numerosas características y medidas puede resultar contraproducente. Además, el ofrece diversas medidas complementarias sobre un mismo conjunto de datos muchas veces deja al usuario perplejo, pues a él sólo le interesa saber si le conviene o no utilizar esos datos, por ello, el poder derivar una medida resumen es algo que también queda pendiente y que podría ser de gran interés aplicado.

En relación a la aplicación y los resultados obtenidos, el grado de complejidad no es alto, las medidas se han podido derivar con operaciones SIG convencionales y procesamientos de los datos en hoja de cálculo. Posiblemente, el comparar los resultados de dos algoritmos sobre un mismo conjunto de datos sea una situación más sencilla que comparar el resultado derivado de un conjunto de datos frente a una referencia (dos conjuntos de datos distintos). En cualquier caso, el ejemplo desarrollado ha permitido entender la necesidad de manejar adecuadamente las relaciones m:n que pueden darse. Como se ha indicado en el apartado anterior, los dos resultados son bastante similares y la mayor diferencia entre los dos resultados está en que el algoritmo MFD ha generado tres subcuencas donde el algoritmo SFD sólo genera una, el algoritmo MFD también ha generado un mayor número de microcuencas (del orden de 0,07 hectáreas).

6. CONCLUSIÓN

La principal aportación de este trabajo es conceptual y se ha centrado en justificar la necesidad de introducir un nuevo nivel de evaluación de la calidad, la calidad funcional, que resulte más informativo para los usuarios pero que, a la vez, pueda ser aplicado por los productores. Este nuevo nivel de evaluación es intermedio entre la calidad como es entendida y materializada actualmente por los productores y la calidad en aplicación, que es lo que realmente interesa al usuario. La calidad funcional puede ser desarrollada sin problemas sobre el marco ISO 19157 siempre que se permita la definición de nuevas medidas de la calidad. Además, su aplicación requiere la especificación formal de casos de uso, y la posible utilización conjunta de varias medidas para definir adecuadamente la complejidad del caso de uso. La calidad funcional vincula los datos geoespaciales con sus procesados, por lo que ofrece una forma mucho más cercana a los usuarios y puede ayudar a los productores a estar más atentos a las necesidades de aquellos.

El ejemplo presentado demuestra que la calidad funcional puede ser aplicada a casos reales y que ofrece un valor añadido respecto a las evaluaciones tradicionales de la calidad de los datos geoespaciales que prácticamente sólo se basan en medias de la exactitud posicional.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto de investigación "Calidad Funcional en Modelos Digitales de Elevaciones del Terreno en Ingeniería" (https://coello.ujaen.es/investigacion/web_giic/funquality4dem) de la Agencia Estatal de Investigación. PID2019-106195RB-I00 / AEI / 10.13039/501100011033.

7. BIBLIOGRAFÍA

Ariza-López F.J., J.F. Reinoso-Gordo, J.L. García-Balboa, I.A, Ariza-López (2022). Quality specification and control of a point cloud from a TLS survey using ISO 19157 standard. *Automation in Construction*, Vol 140, 104353 https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104353

ASQ (2022). Quality glosary. https://asq.org/quality-resources/quality-glossary/f [accedido 11/07/2022]

DGT (2020). Nuevas mediciones, consumos más reales. https://revista.dgt.es/es/motor/reportajes/2020/1217-WLTP.shtml [accedido 11/07/2022]

EU (2007). Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information [Official Journal L 171, 29.6.2007]

EU (2017). Commission Regulation (EU) 2017/1347 of 13 July 2017 correcting Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EU) No 582/2011 and Commission Regulation (EU) 2017/1151 supplementing Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and

of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information, amending Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EC) No 692/2008 and Commission Regulation (EU) No 1230/2012 and repealing Regulation (EC) No 692/2008

Goodchild M., G. Hunter. (1997). A simple positional accuracy for linear features. International Journal Geographical Information Science, 11: 299-306, 1997, DOI: http://dx.doi.org/10.1080/136588197242419

ISO (2013). ISO 19157:2013 Geographic information — Data quality

Mesa-Mingorance J.L., F.J. Ariza-López. (2020). Accuracy Assessment of Digital Elevation Models (DEMs): A Critical Review of Practices of the Past Three Decades. *Remote Sensing*, 12(16):2630 2020, https://doi.org/10.3390/rs12162630

Polidori L., M. El Hage (2020). Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. *Remote Sensing*, 12(21):3522, 2020, https://doi.org/10.3390/rs12213522

RAE (1992). Diccionario de la lengua española. Real Academia Española de la Lengua. Madrid.

Reinoso-Gordo, J.F. (2020). Casos de uso. En proyecto: "Calidad funcional de modelos digitales de elevaciones del terreno en ingeniería", Programa Estatal, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, Convocatoria 2019.

Tang J., P. Pilesjö. (2011). Estimating slope from raster data: a test of eight different algorithms in flat, undulating and steep terrain. *River Basin management* VI 143. https://doi.org/10.2495/RM110131

UN-GGIM (2019). The Global Fundamental Geospatial Data Themes. UNITED NATIONS COMMITTEE OF EXPERTS ON GLOBAL GEOSPATIAL INFORMATION MANAGEMENT. Global Geospatial Information Management Secretariat, Statistics Division, Department of Economic and Social Affairs.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 208-2017

Modelo de interpolación para el análisis espacial de la temperatura urbana

S. Barrao Simorte[1,2], R. Serrano Notivoli[3], J.M. Cuadrat Prats [1,2], M.A. Saz Sanchez[1,2]

[1] Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza.
[2] Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza.
[3] Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid. C. Francisco Tomás y Valiente 1, 28049 Madrid.

sbarrao@unizar.es, roberto.serrano@uam.es, cuadrat@unizar.es, masaz@unizar.es

RESUMEN: El objetivo de esta comunicación es utilizar las TIG para mejorar la caracterización de la variabilidad espacial de la temperatura en los espacios urbanos. Para ello, se ha desarrollado un método de interpolación que permite conocer los patrones espaciales de la temperatura media urbana de Zaragoza a escala diaria. Utilizando como base de datos climáticos la red de observatorios del grupo de investigación Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales, compuesta por 21 sensores termohigrométricos distribuidos en diferentes espacios urbanos de la ciudad y sus alrededores. Utilizaremos los datos temperatura de escala diaria desde marzo de 2015 hasta enero de 2022 para aplicarlos en un modelo de interpolación kriging universal, complementándose con información espacial de diferentes variables. Estas variables complementarias o predictoras serán sometidas a un análisis previo de correlación y regresión con la temperatura, incluyendo en la interpolación solo aquellas variables significativas con mayor correlación. Para la evaluación del modelo se calculó el error cuadrático medio (RMSE) alcanzando el valor más bajo con 0,279ºC el modelo que introducía el Sky View Factor, el índice de rugosidad del terreno, la densidad de suelo impermeable y el índice de vegetación de diferencia normalizada. Obteniendo finalmente como resultado la distribución espacial de la temperatura media en la ciudad de Zaragoza a 100 metros, una interpolación por cada día del periodo de estudio, lo que supone un total de 2507 interpolaciones.

Palabras-clave: interpolación, kriging, temperatura media, clima urbano.

1. INTRODUCCIÓN

La isla de calor urbana (ICU) es un fenómeno ampliamente documentado (Masson et al., 2020; Oke, 1982; Stewart, 2011) que cuantifica cómo las zonas urbanas son más cálidas que su entorno rural. Es probablemente el fenómeno más importante y más estudiado de climatología urbana, con un fuerte impacto en todo el entorno urbano, repercutiendo directamente en aspectos socioeconómicos y sanitarios de estas poblaciones, como el confort, los ingresos hospitalarios, la planificación o el uso energético. Por ello, proporcionar información espacial continua a una escala temporal adecuada en estos espacios es una tarea fundamental pero compleja ya que las observaciones y mediciones meteorológicas suelen estar mal distribuidas o mal representadas en las redes de medición tradicionales.

A menudo, las series de datos climáticos urbanos largas y completas proceden de fuera de la zona urbana, como aeropuertos, y es difícil determinar la verdadera representatividad de la ciudad. Aunque hoy en día muchas ciudades cuentan con al menos una estación dentro de su entorno urbano, ésta sigue siendo insuficiente para un análisis detallado de la realidad urbana. Sin embargo, existe una tendencia creciente donde prolifera el despliegue de redes meteorológicas urbanas densas que está cambiando esta situación (Bassett et al., 2016; Vardoulakis et al., 2013; Warren et al., 2016). El desarrollo y la progresión de los sensores de bajo coste y su calidad demostrada ofrecen nuevas oportunidades para las redes urbanas, obteniendo información a escala horaria o inferior, lo cual es clave en los estudios climáticos urbanos.

En el caso de Zaragoza, el clima urbano y el fenómeno de la ICU se han analizado desde 1990 con diversas metodologías (Cuadrat et al., 2005, 2013, 2015; Saz Sánchez et al., 2003; Vicente Serrano et al.,

2005). Algunos de los estudios comparaban un sensor urbano dentro de la ciudad con un sensor exterior en el aeropuerto, como la mayoría de los estudios climáticos urbanos (Stewart, 2011). En otros, se utilizan transectos urbanos con mediciones de temperatura casi continuas durante un periodo determinado (Cuadrat et al., 1993). En los cuales se realizan diferentes recorridos por la ciudad para analizar la configuración espacial de la ICU, obteniendo la frecuencia e intensidad del fenómeno. También se ha trabajado la temperatura de la superficie mediante el uso de sensores térmicos satelitales o aéreos (de La Riva et al., 1997), pero se debe tener en cuenta sus limitaciones de escala y el periodo de retorno de las imágenes. Además, dichos estudios se centran en la temperatura superficial de los materiales y no en la temperatura del aire. Actualmente se está trabajando con una nueva red climática urbana compuesta por 21 sensores que monitorizan la temperatura y la humedad en diferentes puntos de la ciudad con una alta resolución temporal (Cuadrat et al., 2021).

El objetivo principal de está comunicación es la aplicación y evaluación de un método de interpolación adecuado que representa la estructura espacial de la temperatura urbana diaria para la ciudad de Zaragoza. Un método que permita la transformación de las observaciones puntuales registradas por la red de sensores de formato discreto a continuo, obteniendo una imagen del comportamiento térmico de la ciudad.

2. METODOLOGÍA

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Zaragoza está situada en el noreste de la Península Ibérica (España). Es el quinto municipio español más poblado con más de 714.000 habitantes (2020) (Observatorio Municipal de Estadística, 2021), y la octava área urbana más grande (Ministerio de Transporte, 2021). Su ubicación en la zona central de la Depresión del Ebro, en la confluencia de los ríos Ebro, Gállego y Huerva, marca las características físicas y climáticas de la ciudad. Su topografía no presenta grandes contrastes, destacando las terrazas del río Ebro o el escarpe sobre yesos al norte de la ciudad. El clima de la zona es mediterráneo con influencia continental, con predominio de situaciones anticiclónicas durante las estaciones de verano e invierno (Cuadrat et al., 1993, 2015). Este carácter continental provoca marcados contrastes térmicos estacionales y diarios, llegando a una oscilación térmica media de más de 10 ºC en los meses de verano. El viento es otro factor notable en el clima de Zaragoza. Este frecuente viento del noroeste alcanza una gran velocidad debido a la aceleración que sufre al encajonarse en el Valle del Ebro (Cuadrat et al., 2021).

2.2. DATOS METEOROLÓGICOS

La red de observatorios urbanos está constituida por 21 sensores termohigrométricos que se distribuyen por toda la ciudad y su entorno periurbano más cercano (Figura 1). Los sensores se ubican en lugares representativos de los entornos climáticos más característicos de la ciudad y su entorno, sirviendo como referencia la clasificación de las Zonas Climáticas Locales de Stewart & Oke, 2012; de modo que hubiera una buena representación de los principales espacios. El mantenimiento de los sensores, la recogida de datos y su posterior análisis son realizados por el grupo de investigación Clima, Agua y Cambio Global del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza, en colaboración del departamento de Medio Ambiente y Sostenibilidad del Ayuntamiento de Zaragoza.

Respecto a las características del sensor, son dispositivos de medición HOBOpro v2 y HOBO MX2301 que registran los valores de temperatura y humedad a escala horaria desde marzo de 2015 (Tejedor et al., 2016). Su rango de funcionamiento en temperatura es de -40 ºC a 70 ºC y en humedad de 0 a 100 %, con una una resolución de 0,02 ºC en el caso de la temperatura. Disponen de un data-logger para el almacenamiento de la información y de una cubierta protectora para la radiación solar directa y el efecto de la lluvia.

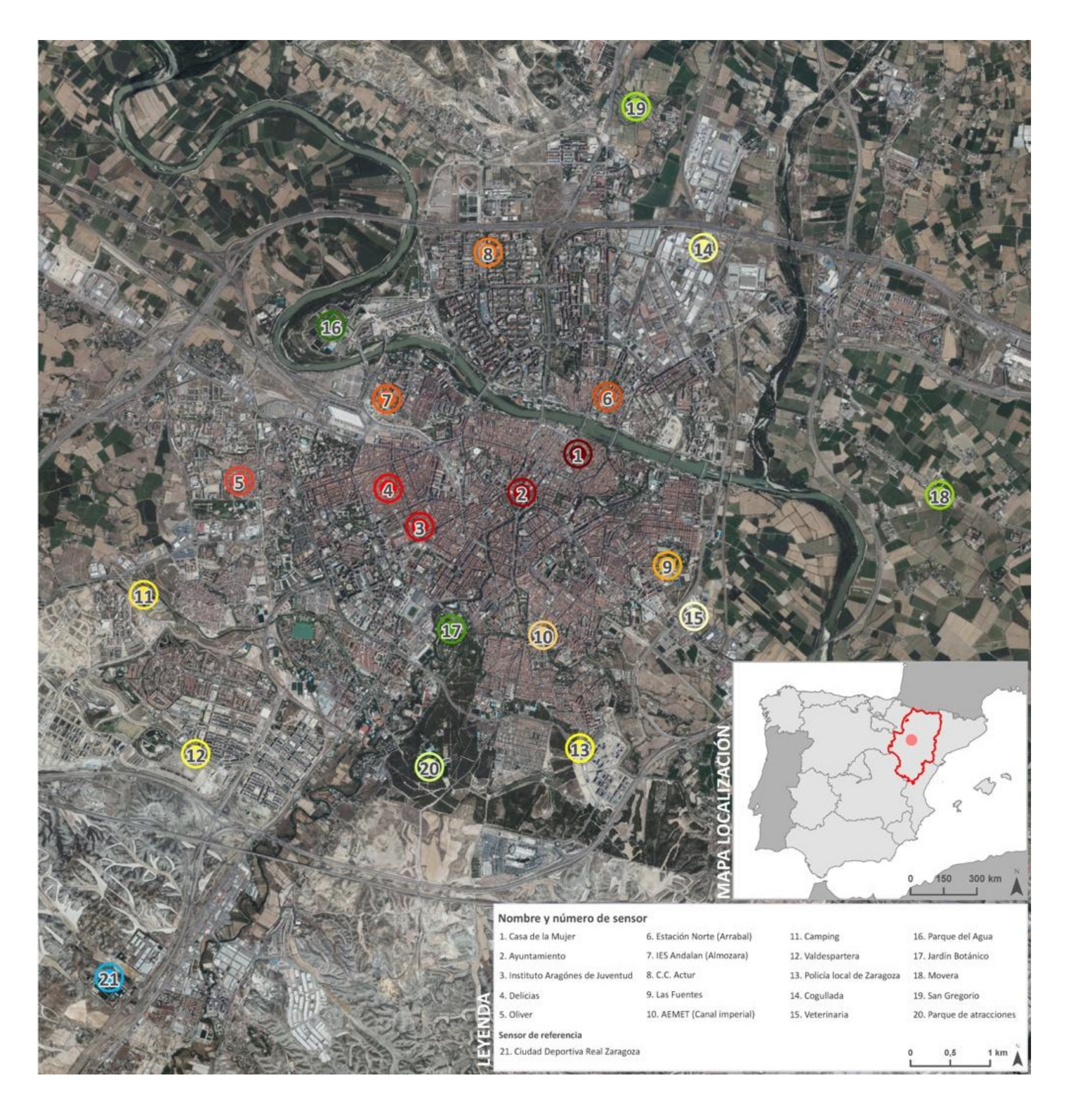


Figura 1. Localización de la red de sensores en la ciudad de Zaragoza.

La base de datos meteorológicos utilizada está compuesta por observaciones horarias de temperatura y humedad desde marzo de 2015 a enero de 2022. Para el cálculo de la interpolación se agruparon las observaciones y se calculó el promedio diario para cada estación. Se aplicó un control de calidad específico para bases de datos urbanas para evitar valores atípicos y mediciones inverosímiles (Barrao et al., 2022). Se eliminaron *outliers* extremos eliminando temperaturas inferiores a -15ºC y superiores a 50ºC y *outliers* específicos ajustando las observaciones a 3 desviaciones estándar respecto a toda la red para cada medición. También se analizaron la aparición de valores repetidos y se detectaron tan solo en el caso de la humedad. No se eliminaron de la base de datos al comprobar que se trataba de situaciones de niebla y por lo tanto un fenómeno meteorológico normal. Por último, aplicando el cálculo de situaciones sinópticas se analizaron las variaciones horarias de las observaciones evitando saltos que no se debiesen a condiciones climáticas concretas, como lluvias de verano o la desaparición de nieblas.

2.3. VARIABLES ESPACIALES PREDICTORAS

Para poder desarrollar un modelo de interpolación más ajustado, las mediciones de temperatura diaria se analizaron conjuntamente con una serie de datos auxiliares (Figura 2). Estas variables predictoras se escogieron en base a trabajos previos realizados en Zaragoza (Cuadrat et al., 2014) y a trabajos desarrollados en otras ciudades (Dirksen et al., 2020). Se tuvieron en cuenta los siguientes conjuntos de datos: Modelo Digital de Superficies (MDS), Modelo Digital de Terreno (MDT), Zonas climáticas locales (LCZ), Sky View Factor (SVF), Radiación solar total (RAD), Índice de rugosidad del terreno (TRI), Densidad de suelo impermeable (IMD), Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y distancia a masas de agua. Para la interpolación todos los predictores se vuelven a reescalar a una cuadrícula de 100 m, considerada la resolución adecuada para el tamaño de una ciudad media. El remuestreo espacial de los datos se realizó en R aplicando el paquete *raster* y la opción bilineal. Además, los predictores fueron centrados y escalados.

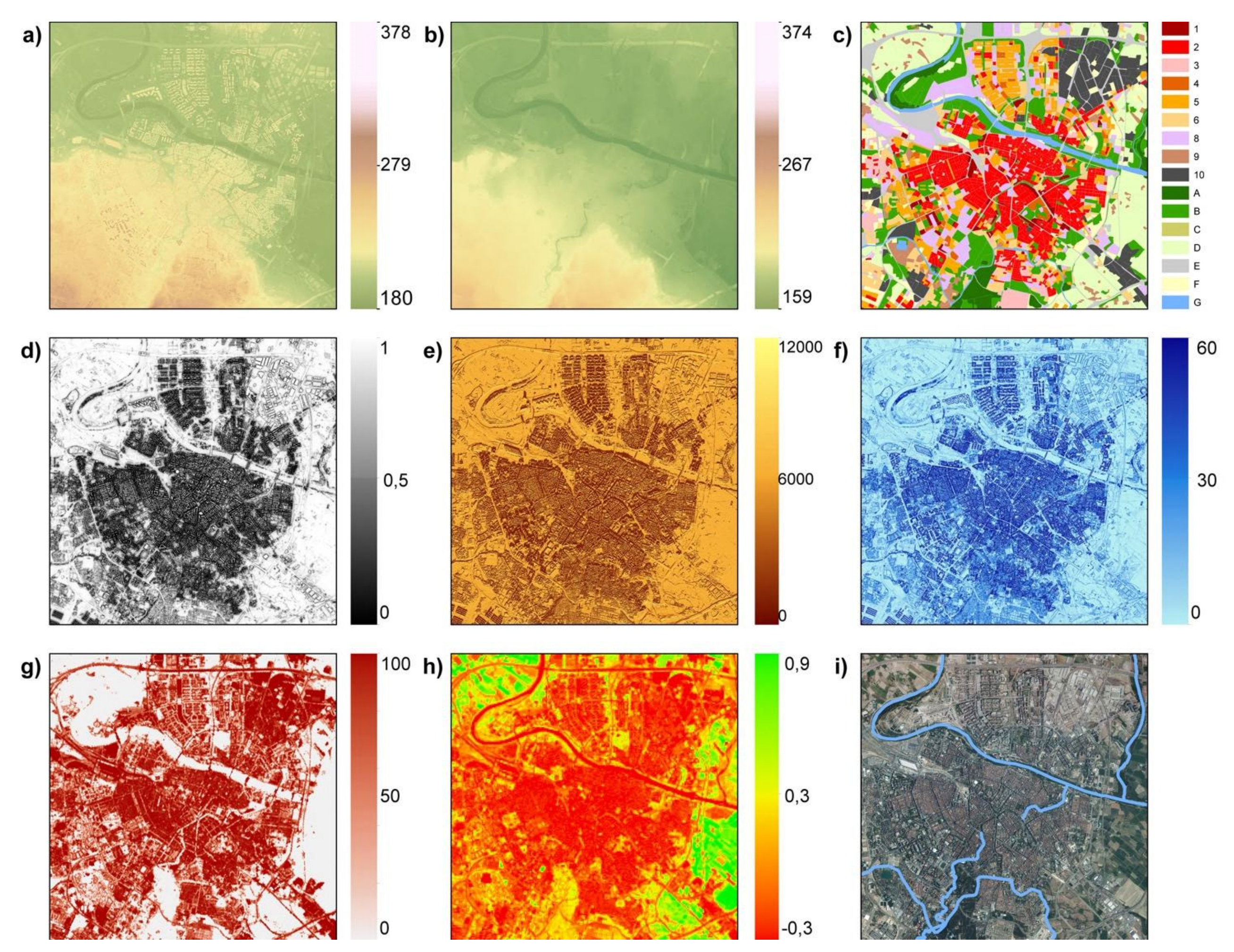


Figura 2. Variables predictoras utilizadas en el modelo de interpolación. Los nueve conjuntos de datos: Modelo Digital de Superficies (a), Modelo Digital de Terreno (b), Zonas climáticas locales (c), Sky View Factor (d), Radiación solar total (e), Índice de rugosidad del terreno (f), Densidad de suelo impermeable (g), Índice de vegetación de diferencia normalizada (h) y distancia a masas de agua (i).

2.3.1. *Modelo Digital de Superficies (MDS)*

El MDS representa la superficie más elevada sobre el terreno, sea de origen natural o artificial como las edificaciones. Los datos de partida para la generación de esta variable son los ficheros de nubes de puntos LiDAR clasificados y editados. Los datos se obtuvieron del portal del Instituto Geográfico Nacional, concretamente se utilizó el modelo digital de superficies 1ª Cobertura con paso de malla de 5 m (MDS05) del año 2010.

2.3.2. *Modelo Digital del Terreno (MDT)*

El MDT es un modelo digital referido a las elevaciones del terreno de un espacio concreto, desestimando elementos como bosques o edificaciones. Al igual que en el caso del MDS parte de los ficheros LiDAR y también se obtuvo la información del Instituto Geográfico Nacional. En este caso, modelo digital del terreno 2ª Cobertura con paso de malla de 2 m (MDT02) del año 2016.

2.3.3. *Zonas climáticas locales (LCZ)*

Las LCZ o Local Climate Zones es un sistema de clasificación del uso del suelo completo y a pequeña escala, desarrollado originalmente para cuantificar la relación entre la isla de calor urbana (UHI) y el patrón morfológico urbano por Stewart y Oke (2012). En esta ocasión se optó por utilizar la clasificación desarrollada por Oliveira (2020) adaptándola a nuestra zona de estudio y utilizando ArcGIS como software.

2.3.4. *Sky View Factor (SVF)*

El SVF muestra el porcentaje de cielo que puede ser visto desde una localización. Para calcularlo utilizamos el software de información geográfica SAGA GIS, en particular el módulo *Sky View Factor* dentro de *Terrain Analysys*. Recurriendo como base al MDS de 5m previamente descargado y utilizando el método de sectores con un valor predeterminado de 8.

2.3.5. *Radiación solar total (RAD)*

Se calculó la radiación solar potencial total que incide sobre la ciudad, una variable muy relacionada con la SVF y la temperatura debido a la insolación. De nuevo se utilizó SAGA GIS pero en esta ocasión el módulo *Potential Incoming Solar Radiation*. Para calcularlo fue necesario incluir el MDS a 5m y el SVF. Se obtuvo la insolación total para todo el periodo de estudio (2015-2022), teniendo en cuenta las sombras y obteniendo los resultados en kWh/m^2.

2.3.6. *Índice de rugosidad del terreno (TRI)*

El TRI es un índice sencillo que tiene como objetivo cuantificar la heterogeneidad de la topografía en un espacio concreto. De nuevo se utilizó SAGA GIS con el módulo *Terrain Ruggedness Index* dentro de *Terrain Analysis* e incorporando el MDS de 5m.

2.3.7. *Densidad de suelo impermeable (IMD)*

El IMD *o Imperviousness Density* representa la impermeabilidad del suelo. Es decir, el porcentaje y cambio artificial de la cubierta del suelo o sellado. Los datos utilizados provienen del programa Copernicus del servicio *Land Monitoring Service*. Con una resolución de 10m, se descargó el conjunto de datos de 2018 para España, ajustándose posteriormente a la zona de estudio.

2.3.8. *Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)*

El NDVI es un indicador simple de la actividad fotosintética de las plantas que nos da información sobre el vigor de la vegetación. Para su aplicación dentro del modelo se utilizó el promedio del NDVI máximo del periodo de verano. Los datos se obtuvieron a partir de una serie temporal de imágenes con los sensores TM, ETM+ y OLI de Landsat entre 2015 y 2021, a las que se aplicaron una serie de correcciones de reflectividad de la superficie de las imágenes mediante Google Earth Engine (GEE) (Hoffrén et al., 2022).

2.3.9. *Distancia a masas de agua*

Las masas de agua influyen en las pérdidas o ganancias de temperatura del espacio que las rodea, por ello se ha calculado la distancia en metros de los sensores a las principales masas de agua de la ciudad. Donde destaca el río Ebro como principal superficie de agua de la ciudad, pero también los tramos descubiertos del río Huerva, Gállego y el Canal Imperial.

2.4. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

Con el objetivo de saber cual de las variables previamente descritas guarda mayor relación con la temperatura y debe incluirse en el modelo de interpolación se ha realizado un análisis de correlación y regresión lineal. Se ha optado por comparar la temperatura media total de toda la serie para cada sensor con el valor de cada una de las variables predictoras para el mismo sensor. En este caso, para extraer el valor de cada variable se realizó un buffer de 100m alrededor de cada sensor para obtener una representación del entorno urbano en el cual se encuentra.

Antes de todo se comprobó la normalidad de todas las variables aplicando el test de Shapiro-Wilk. En el caso de que las variables tuvieran una distribución normal se calculó el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación. Si la variable no se asemejaba a una distribución normal se intentó transformar mediante la aplicación del logaritmo, la raíz cuadrada o la transformación Box-Cox para poder aplicar el método paramétrico de Pearson. Por último, si la variable no era normal ni normalizable se optó por calcular la correlación mediante un método no paramétrico, concretamente por Rangos de Spearman.

2.5. TÉCNICA DE INTERPOLACIÓN

Una técnica común de interpolación geoestadística es el kriging ordinario (Cressie 1988). El kriging ordinario aprovecha la autocorrelación espacial entre las observaciones. Es decir, que las mediciones más cercanas tienden a ser más similares. Sin embargo, el kriging ordinario no tiene en cuenta la variación entre

observatorios y sus características geográficas a gran escala, asumiendo una estacionalidad intrínseca en el modelo. Por el contrario, el kriging universal permite que el proceso espacial incluya una tendencia subyacente que puede describirse mediante una función lineal de predictores y asume la estacionalidad intrínseca solo después de tener en cuenta esta tendencia subyacente (Pebesma, 2006). De este modo, la temperatura urbana tiene un patrón espacial que puede ser explicado mediante covariables como las variables predictoras expuestas. Lo que sugiere que el kriging universal puede mejorar el rendimiento de la interpolación y permite la estimación del error que rodea al valor estimado. Debido a ello y la bibliografía consultada (Zhang, 2011) se optó por este método de interpolación para calcular la temperatura media diaria en el entorno urbano de Zaragoza, incluyendo las variables predictoras más correlacionadas.

Para cuantificar la precisión del modelo se utilizó la validación cruzada que permitió estimar el error cuadrático medio (RMSE) para las diferentes combinaciones de variables. Es decir, para cada observación, se usaron todas las demás observaciones para predecir cuál sería esa observación, luego se consideró la diferencia entre la predicción del modelo y la observación real para representar el error en esa ubicación. Las puntuaciones más bajas de RMSE indican, por lo tanto, una mayor precisión del modelo.

En total, calculamos cinco medidas de validación cruzada: (1) kriging universal que incorporó las LCZ, (2) kriging universal que incorporó el SVF, (3) kriging universal que incorporó las LCZ junto al SVF, (4) kriging universal que incorporó el IMD y el NDVI, y (5) kriging universal que incorporó todas las variables predictivas correlacionadas significativamente a excepción de las LCZ.

Una vez calculado el RMSE de todas las opciones se utilizó el modelo con menor error y se implementó en un bucle para interpolar para cada día del periodo la temperatura media urbana de Zaragoza. Los softwares utilizados para el desarrollo de esta metodología son el sistema de información geográfica ArcGIS, SAGA GIS y el entorno de programación R, principalmente utilizando en el caso de la interpolación las herramientas "*autokrige*" y "*compare.cv*" de *automap*.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CORRELACIÓN DE VARIABLES PREDICTORAS

Tras relacionar la temperatura con las diferentes variables seleccionadas obtuvimos, en primer lugar, que el test de normalidad de Shapiro Wilks mostró que todas las variables a excepción del MDS, MDT y RAD eran variables normales (>0,05). Estas tres variables no normales se intentaron normalizar mediante una transformación de Box-Cox, pero RAD seguía siendo no normal. De este modo, no pudimos aplicar Pearson y tuvimos que utilizar Spearman. Los valores de correlación, significación y determinación se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Tabla con valores de correlación de temperatura media y variable predictoras.

Variables	*Correlación*	*Significación*	*Determinación*
LCZ	-0,7659454	5,17426E-05	0,5866724
MDS	-0,2291592	0,317690268	0,05251396
MDT	-0,3390813	0,132664337	0,11497615
SVF	-0,69973	0,000414332	0,4896221
RAD	-0,5883117	0,005872	
TRI	0,683872	0,000629996	0,46768098
IMD	0,6204009	0,002694716	0,38489726
NDVI	-0,6177298	0,002845481	0,3815901
NEAR_DIST	-0,1854491	0,420927014	0,03439138

Los valores obtenidos muestran que todas las variables a excepción de los modelos de elevaciones y la distancia a las masas de agua son significativas. De las variables significativas las más correlacionadas con la temperatura son las LCZ, el SVF, el TRI, el IMD y el NDVI. Destaca las zonas climáticas locales con un valor de -0,76, una correlación negativa que indica que conforme aumenta el valor de LCZ desciende el de temperatura. Esto se debe a que las clases más altas de LCZ se corresponden con las clases más naturales, con mayor presencia de vegetación o más despejadas; mientras que las menores se corresponden a clases urbanas más densamente urbanizadas. También muestran correlaciones negativas las variables SVF (-0,69) y NDVI (-0,61), reflejando como aquellos espacios más abiertos con menor presencia de edificaciones permiten

una mejor ventilación que suaviza las temperaturas. O el caso de la vegetación cuya presencia (mayor NDVI) está relacionada con espacios con una temperatura más baja que los espacios artificiales (Cuadrat, et al, 2021). El IMD tiene una correlación positiva de 0,62 reflejando como las cubiertas impermeables artificiales y más compactas están relacionadas con temperaturas más elevadas, debido principalmente al comportamiento térmico de los materiales que las conforman. El índice de rugosidad o TRI alcanza una correlación de 0,68, ya que aquellos espacios con una mayor rugosidad como los espacios urbanos con una densidad de edificación compacta muy elevada cuentan con temperaturas más elevadas que los espacios más planos que permiten mejor ventilación y un menor juego de sombras.

De este modo se optó por utilizar solo aquellas variables que fueran significativa y que alcanzaran valores de correlación más elevados. Estas son: Zonas climáticas locales (LCZ), Sky View Factor (SVF), Índice de rugosidad del terreno (TRI), Densidad de suelo impermeable (IMD) e Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

3.2. INTERPOLACIÓN

En primer lugar, en la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos de la validación cruzada reflejando la precisión de los diferentes modelos analizados. Cada uno de los modelos incorpora diferentes combinaciones de variables para comprobar cual permite un mejor ajuste con la realidad y un menor error. Los modelos fueron: (1) kriging universal que incorporó las LCZ, (2) kriging universal que incorporó el SVF, (3) kriging universal que incorporó las LCZ junto al SVF, (4) kriging universal que incorporó el IMD y el NDVI, y (5) kriging universal que incorporó todas las variables predictivas correlacionadas significativamente a excepción de las LCZ.

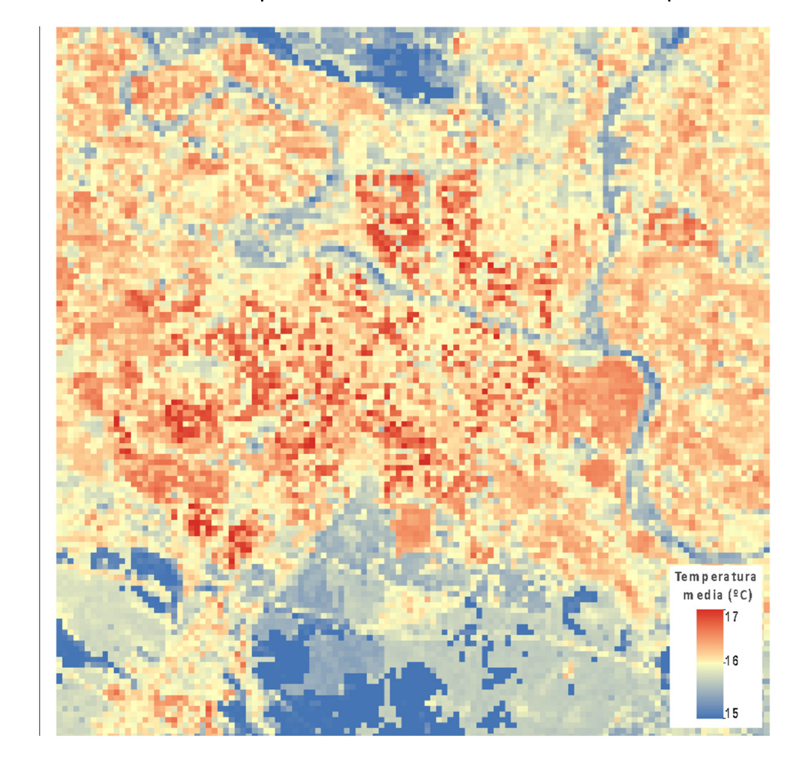
Tabla 2. Tabla de estadísticos de error de la validación cruzada para cada modelo de interpolación.

Estadísticos	*KU con LCZ*	*KU con SVF*	*KU con LCZ y SVF*	*KU con IMD y NDVI*	*KU con SVF, TRI, IMD y NDVI*
Mean Error	-0,003515	-0,01119	0,004185	-0,02264	-0,01987
Me Mean	-0,0002158	-0,000687	0,0002569	-0,00139	-0,00122
MAE	0,2747	0,2253	0,2348	0,2824	0,2173
MSE	0,1144	0,07934	0,08175	0,1227	0,07829
MSNE	1,3200	1,1030	1,023	1,671	1,167
Correlación Obs Pred	0,6091	0,7329	0,7242	0,5729	0,732
Correlación Pred Res	-0,2868	-0,1584	-0,1716	-0,2874	-0,07792
RMSE	0,3382	0,2817	0,2859	0,3503	0,2798
RMSE sd	0,808	0,673	0,6831	0,8369	0,6686
URMSE	0,3381	0,2815	0,2859	0,3495	0,2791
IQR	0,3873	0,3187	0,4161	0,4263	0,2983

Entre los estadísticos de error que se calcularon está el error medio (Mean Error) que muestra la media de los residuales de la validación cruzada, el error medio cuadrado (MSE) o la correlación entre los valores observados y predichos. La interpretación en todos los casos es muy similar; a rasgos generales, cuanto menor sea el resultado mejor ajuste tiene el modelo, a excepción de la correlación entre observados y predichos que debe acercarse a 1. En esta comunicación utilizaremos el error cuadrático medio (RMSE) como indicador principal para la validación del modelo. Siendo el último modelo el que agrupa cuatro de las variables más significativas el que menor error registra, con 0,2798. De este modo seleccionaremos el kriging universal en el que se incorporan las variables de SVF, TRI, NDVI y IMD como modelo de interpolación para el cálculo de la temperatura media para cada día del periodo de estudio.

Tras la aplicación del modelo se obtuvieron 2507 rasters, uno para cada día del periodo de estudio, representando la distribución espacial de la temperatura media en la ciudad de Zaragoza. Para la comunicación se calculó el promedio de todos estos rasters para obtener una aproximación a la distribución de la temperatura media en toda la ciudad, Figura 3. Vemos como el resultado de la interpolación permite diferenciar fácilmente el contorno de la ciudad, así como las principales vías de comunicación y los polígonos y urbanizaciones adosadas a estas. Espacios que contrastan con las zonas ribereñas con una elevada presencia de agua y vegetación que se traduce en temperaturas más bajas, en torno a 15ºC. Las áreas de la ciudad que obtuvieron las temperaturas más bajas se relacionan con los espacios elevados al norte y sur de la ciudad, que se caracterizan con espacios despejados donde abundan los suelos desnudos o con vegetación de porte bajo donde las coberturas artificiales son nulas. Respecto a la ciudad, la mayor parte de los valores en entornos urbanizados oscilan entre los 16ºC y 17ºC. Destaca como el centro de la ciudad no es tan cálido como otros espacios, también urbanos pero menos compactos, como el Actur. Se debe tener en cuenta que estamos interpolando temperatura media diaria y no otros fenómenos con la ICU. Por lo cual, es posible que al tratarse de un promedio el comportamiento diurno de las zonas céntricas donde no solo no hay ICU sino que aparece el fenómeno inverso, la isla de frío urbano, provoque que los valores medios se equilibrasen. La oscilación térmica para el raster en su conjunto es de cerca de 2ºC lo que puede compararse con los resultados de los estudios previos en la ciudad, los cuales muestran una diferencia de entre 1,5ºC y 2ºC entre las zonas céntricas de la ciudad y los alrededores rurales (Barrao, et al., 2022).

Figura 3. Temperatura media diaria del periodo marzo de 2015 a enero 2022 para la ciudad de Zaragoza.



4. CONCLUSIONES

Con una resolución final de 100m, se reconstruyó la temperatura media diaria en el ámbito urbano de Zaragoza para el periodo de marzo de 2015 a enero de 2022. El objetivo de esta comunicación era presentar los primeros esfuerzos en el desarrollo de una nueva metodología para la interpolación de datos climáticos en espacios urbanos. Finalmente se utilizó un modelo de kriging universal en el cual se incluyeron cuatro variables predictivas: el sky view factor, el índice de rugosidad (TRI), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el porcentaje de cubierta artificial en el suelo (IMD). La validación del modelo mostró un valor de RMSE de 0,2798ºC, siendo el modelo con menor error.

Los patrones de temperatura a escala urbana son similares a los examinados en otros proyectos. Se observan claramente las diferencias entre los espacios urbanos y los rurales, pero esta metodología añade mayor información al representar los patrones espaciales que sigue la temperatura en algunos de los espacios urbanos más representativos, con valores de temperatura que oscilan entre los 15ºC y los 17ºC.

Estos resultados son el primer paso hacia un modelo de interpolación climático urbano. Por ello se trabaja en el cálculo de nuevos modelos en los cuales las variables predictoras no sean elementos fijos sino variables que cambien con el tiempo y que permitan una mejor representación de la realidad. Además, se aplicará a nuevas variables climáticas como la temperatura máxima o mínima. Del mismo modo que se intentará llevar a cabo interpelaciones a diferentes escalas temporales: horarias, diurnas, nocturnas o estacionales. Si se alcanza una mejor representación de las variaciones de temperatura locales, los mapas de alta resolución que surjan como resultado pueden tener aplicaciones importantes y útiles en estudios de islas de calor urbano, análisis de tendencias locales y evaluación de modelos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Medioambiente y Sostenibilidad del Ayuntamiento de Zaragoza, su colaboración en la instalación y mantenimiento de la red de sensores urbanos. Además, los autores cuentan con el apoyo del Gobierno de Aragón a través del "Programa de grupos de investigación" (grupo H09_20R, "Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales"). Además, los autores de la investigación agradecen la colaboración del Instituto Universitarios de Ciencias Ambientales (IUCA) del cual son miembros.

5. BIBLIOGRAFÍA

Barrao, S., Serrano-Notivoli, R., Cuadrat, J. M., Tejedor, E., & Sánchez, M. A. S. (2022). Characterization of the UHI in Zaragoza (Spain) using a quality-controlled hourly sensor-based urban climate network. Urban Climate, 44, 101207. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101207

Bassett, R., Cai, X., Chapman, L., Heaviside, C., Thornes, J.E., Muller, C.L., Young, D.T. y Warren, E.L. (2016). Observations of urban heat island advection from a high-density monitoring network. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 142, 2434–2441. https://doi.org/10.1002/qj.2836

Cressie, N. (1988). Spatial prediction and ordinary kriging. Mathematical geology, 20(4), 405-421.

Cuadrat, J.M., De la Riva, J., Lopez, F. y Marti, A. (1993). El medio ambiente urbano en Zaragoza. Observaciones sobre la “isla de calor.” Anales de Geografía la Universidad Complutense, 127–138.

Cuadrat, J.M., Serrano-Notivoli, R., Barrao, S., Saz Sánchez, M.Á. y Tejedor, E. (2021). Temporal variability of the urban heat island in Zaragoza (Spain). Cuadernos de Investigación Geográfica, 48, 97-110. https://doi.org/10.18172/CIG.5022

Cuadrat, J.M., Serrano-Notivoli, R. y Tejedor, E. (2013). Heat and cold waves in Spain, in: García-Legaz, C., Valero, F. (Eds.), Adverse Weather in Spain. AMV EDICIONES, Madrid, 307–324.

Cuadrat, J.M., Vicente-Serrano, S. y Saz Sánchez, M.Á. (2015). Influence of different factors on relative air humidity in Zaragoza, Spain. Front. Earth Science, 3, 1–8. https://doi.org/10.3389/feart.2015.00010

Cuadrat , J.M., Vicente Serrano, S. y Saz Sánchez, M.Á. (2005). Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): la isla de calor y sus factores condicionantes. Boletín la Asociación de Geógrafos Españoles, 311–327.

de La Riva, J.R., Cuadrat, J.M., López-Martín, F. (1997). Aplicación de las imágenes Landsat TM al estudio de la isla térmica de Zaragoza. Primeros resultados. Geographicalia, 35, 227-242. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1997351701

Dirksen, M., Knap, W. H., Steeneveld, G. J., Holtslag, A. A., & Tank, A. M. (2020). Downscaling daily air-temperature measurements in the Netherlands. Theoretical and Applied Climatology, 142(1), 751-767.

Hoffrén, R., Miranda, H., Pizarro, M., Tejero, P., y García, M. B. (2022). Identifying the factors behind climate diversification and refugial capacity in mountain landscapes: the key role of forests. Remote Sensing, 14(7), 1708.

Observatorio Municipal de Estadística. (2021). Cifras de Zaragoza. Datos demográficos obtenidos del padrón municipal de habitantes., Excmo. Ayu. ed, Revista Cifras de Zaragoza. Zaragoza.

Oke, T. (1982). The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108, 1–24. https://doi.org/10.1002/qj.49710845502

Pebesma, E. J. (2006). The role of external variables and GIS databases in geostatistical analysis. Transactions in GIS, 10(4), 615-632.

Stewart, I. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. The International Journal of Climatology, 31, 200–217. https://doi.org/10.1002/joc.2141

Stewart, I., y Oke, T. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93, 1879–1900. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1

Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J. y Voogt, J. (2020). Urban climates and climate change. Annual Review of Environment and Resources, 45, 411–444. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623

Ministerio de Transporte, M. y A.U. (2021). Áreas urbanas en España 2020. https://doi.org/796-21-023-3

Vardoulakis, E., Karamanis, D., Fotiadi, A. y Mihalakakou, G. (2013). The urban heat island effect in a small Mediterranean city of high summer temperatures and cooling energy demands. Solar Energy, 94, 128–144. https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.016

Tejedor, E., Cuadrat, J.M., Saz Sánchez, M.Á., Serrano-Notivoli, R., López, N. y Aladrén, M. (2016). Islas de calor y confort térmico en Zaragoza durante la ola de calor de julio de 2015. Clima, Sociedad, Riesgos y Ordenación Del Territorio, 141–151. https://doi.org/10.14198/XCongresoAECAlicante2016-13

Warren, E.L., Young, D.T., Chapman, L., Muller, C., Grimmond, C.S.B. y Cai, X. (2016). The Birmingham Urban Climate Laboratory-A high density, urban meteorological dataset, from 2012-2014. Scientific Data, 3, 1–8. https://doi.org/10.1038/sdata.2016.38

Zhang, K., Oswald, E. M., Brown, D. G., Brines, S. J., Gronlund, C. J., White-Newsome, J. L., ... & O'Neill, M. S. (2011). Geostatistical exploration of spatial variation of summertime temperatures in the Detroit metropolitan region. Environmental research, 111(8), 1046-1053.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 218-226

Correlación entre las regiones espectrales del IRoc y del VIS e IRc en imágenes Sentinel-2 en diferentes cubiertas mundiales: Retos y oportunidades

N. Cartes[1], X. Pons[1]

[1] GRUMETS, Departament de Geografia, Universitat Autònoma de Barcelona. Ed. B, 08193, Catalonia, Spain.

nuria.cartes@uab.cat, xavier.pons@uab.cat

RESUMEN: En los últimos años, cada vez son más los estudios realizados combinando la captación de imágenes multiespectrales desde un *Unmanned Aerial System*, UAS, o dron con imágenes de la constelación Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea, ESA. En efecto, la sinergia entre las imágenes de drones y de satélite ofrece posibilidades ampliamente demostradas en numerosos trabajos en los últimos años. Aún con ello, la resolución espectral de las cámaras embarcadas en los drones suele centrarse, por motivos económicos y técnicos, en la región espectral del visible (VIS) y, a lo sumo, llegar hasta el infrarrojo cercano (IRc). Esta situación contrasta con el hecho que las imágenes del sensor MultiSpectral Instrument, MSI, de Sentinel-2, también cuentan, como las de otras plataformas (e.g., Landsat), con datos recogidos en la región espectral del infrarrojo de onda corta (IRoc), bandas 11 (1539-1682 nm) y 12 (2078-2320 nm). Siendo, pues, que los datos en el IRoc desde un dron no están habitualmente disponibles, nuestros retos son proponer una alternativa para su obtención y un método para su aproximación. Ante estos retos, las hipótesis de este trabajo son que la alternativa se encuentra en la obtención de bandas sintéticas del IRoc a partir de algunas, o todas, las otras regiones captadas, y que la estimación de los valores puede realizarse con un razonable nivel de exactitud a partir de la correlación lineal múltiple con las bandas del visible y del IRc tomadas desde el mismo sensor en el mismo instante. En este trabajo mostraremos los primeros resultados que demuestran, en diferentes zonas y tipos cubiertas en varios puntos del mundo, que la correlación es altamente satisfactoria y, por tanto, que la propuesta tiene pleno sentido. Todo ello abre un abanico de oportunidades para mejores correcciones radiométricas de las imágenes de Teledetección en el IRoc, tan importante en estudios de vegetación, cubiertas del suelo, etc.

Palabras-clave: corrección radiométrica, Sentinel-2, MSI, infrarrojo de onda corta, UAS.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Durante la última década avances tecnológicos como la miniaturización de los sensores o el desarrollo de software han propiciado un incremento notable en la utilización de sensores de teledetección embarcados en sistemas aéreos no tripulados (UAS o drones) en una amplia gama de ámbitos (forestal, agrícola, ecológico, minería, etc.) (Aasen et al., 2018; Padró, Carabassa, et al., 2019). Los UAS pueden equiparse con diferentes tipos de sensores: cámaras RGB, multiespectrales, hiperespectrales, térmicas o sensores lidar (Yao et al., 2019). Entre los sensores más habituales se encuentran las cámaras RGB y las multiespectrales en el espectro visible (VIS) e infrarrojo cercano (IRc) debido a factores como su menor coste económico en comparación con los otros, o a la existencia de software que facilita el análisis de los datos obtenidos (Balestrieri et al., 2021). Paralelamente, ha aumentado la búsqueda de sinergias entre las imágenes de UAS y las imágenes de satélite, puesto que las primeras aportan datos a nivel centimétrico aunque, por lo general, en un número reducido de bandas espectrales, y las segundas ofrecen datos en un amplio rango espacial (decenas a miles de km), espectral y temporal (revisita periódica), aunque con una resolución espacial mucho menos detallada (Emilien et al., 2021).

En concreto, el mayor incremento de estudios publicados se relaciona con las imágenes multiespectrales de satélite ofrecidas en abierto, como serían las capturadas desde Sentinel-2, Landsat, Gaofen o MODIS (Emilien et al., 2021). De ellas, destacan las constelaciones Sentinel-2 y Landsat al disponer actualmente de 2 plataformas cada una, equipadas con sensores diseñados para registrar datos en longitudes de onda similares que van desde el VIS al infrarrojo de onda corta (IRoc), o incluso al infrarrojo térmico en el caso de

Landsat.

La constelación Sentinel-2 del programa espacial Copernicus de la European Space Agency, ESA, está constituida por dos satélites, el Sentinel-2A y el Sentinel-2B, provistos de un sensor denominado MSI. Se trata de una constelación relativamente reciente, ya que el 2A fue lanzado el 23 de junio del 2015 y el 2B el 7 de marzo de 2017. Se caracterizan por una órbita polar helio-síncrona a unos 786 km de altura, con un tiempo de revisita de 5 días entre los dos en el Ecuador. Desde dichas plataformas, el sensor MSI dispone de un barrido de 290 km aproximadamente con una resolución radiométrica de 12 bits. Su sensibilidad radiométrica abarca desde las longitudes de onda del VIS-IRc (411 nm – 880 nm) hasta las del IRoc 1 y 2 (1539-1682 nm y 2078-2320 nm, respectivamente), distribuidas en 13 bandas en total. Los detalles de la resolución espectral y espacial de las imágenes de Sentinel-2 nivel 1C de la ESA pueden consultarse en https://sentinels.copernicus.eu/ar/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload/resolution-and-swath.

Las sinergias entre las imágenes multiespectrales de los sensores embarcados en UAS y las imágenes procedentes de Sentinel-2 o de Landsat se exploran en múltiples trabajos, por ejemplo en el ámbito de la corrección radiométrica (Padró et al., 2018), la georeferenciación (Padró et al., 2019), la predicción de las propiedades del suelo (Gomez et al., 2018), etc. Una de las sinergias estudiadas con creciente interés implica la utilización de las imágenes multiespectrales de los UAS para estimar datos del Sentinel-2 en los rangos espectrales en que los UAS no suelen aportarlos, concretamente en el rango espectral correspondiente al IRoc (Alvarez-Vanhard et al., 2020; Jarocińska et al., 2022).

La utilidad de la estimación de las bandas de IRoc viene marcada por su importancia en el cálculo de numerosos índices en minería, glaciología, sequías, incendios, fenología, control de plagas, etc. (Huo et al., 2021; Liu et al., 2020; Misra et al., 2020; Soares et al., 2022; Sonnentag et al., 2012; Zhang et al., 2019).

Además, dicha estimación de las bandas del IRoc, apoyada en las imágenes multiespectrales de gran detalle en cubiertas específicas, podría revertir en la mejora de la corrección radiométrica de las imágenes de Sentinel-2 (y de otras plataformas como Landsat) para diferentes cubiertas, a falta de datos objetivos en la mayoría de los casos. De esta manera, podría mejorarse la elaboración de mapas de cubiertas del suelo (Alonso et al., 2021; González-Guerrero y Pons, 2020; Padial-Iglesias et al., 2022; Pucher et al., 2022)

Las hipótesis de este trabajo es que, ante la falta de datos en los rangos espectrales del IRoc en las imágenes multiespectrales adquiridas desde UAS, la alternativa es la obtención de bandas sintéticas del IRoc a partir de algunas, o todas, las otras regiones captadas, y que la estimación de los valores puede realizarse con un razonable nivel de exactitud a partir de la correlación lineal múltiple con las bandas del visible y del IRc tomadas desde el mismo sensor en el mismo instante.

En este estudio se propone un método para obtener las bandas sintéticas de IRoc a partir de las bandas del VIS-IRc a partir de la regresión linear múltiple, aplicada en otros estudios como método para la estimación de valores (Jafarbiglu y Pourreza, 2022; Mishra et al., 2022).

2. MATERIAL Y ÁREA DE ESTUDIO

Las imágenes multiespectrales elegidas para el estudio de la relación entre las bandas de las longitudes de onda de VIS-IRc e IRoc 1 y 2, son imágenes multiespectrales MSI de la constelación Sentinel-2, 2 imágenes en total de nivel L1C, es decir en reflectividad en la parte alta de la atmósfera (TOA). En este estudio se han utilizado los productos oficiales de Sentinel-2 de la ESA con nivel de procesado L1C, es decir, en unidades de reflectividad (R_TOA*10 000) obtenidos a través de Copernicus Access Hub.

Por tanto, el sensor MSI es sensible a rangos de longitudes de onda similares a los existentes en la mayoría de otros sensores (Figura 1).

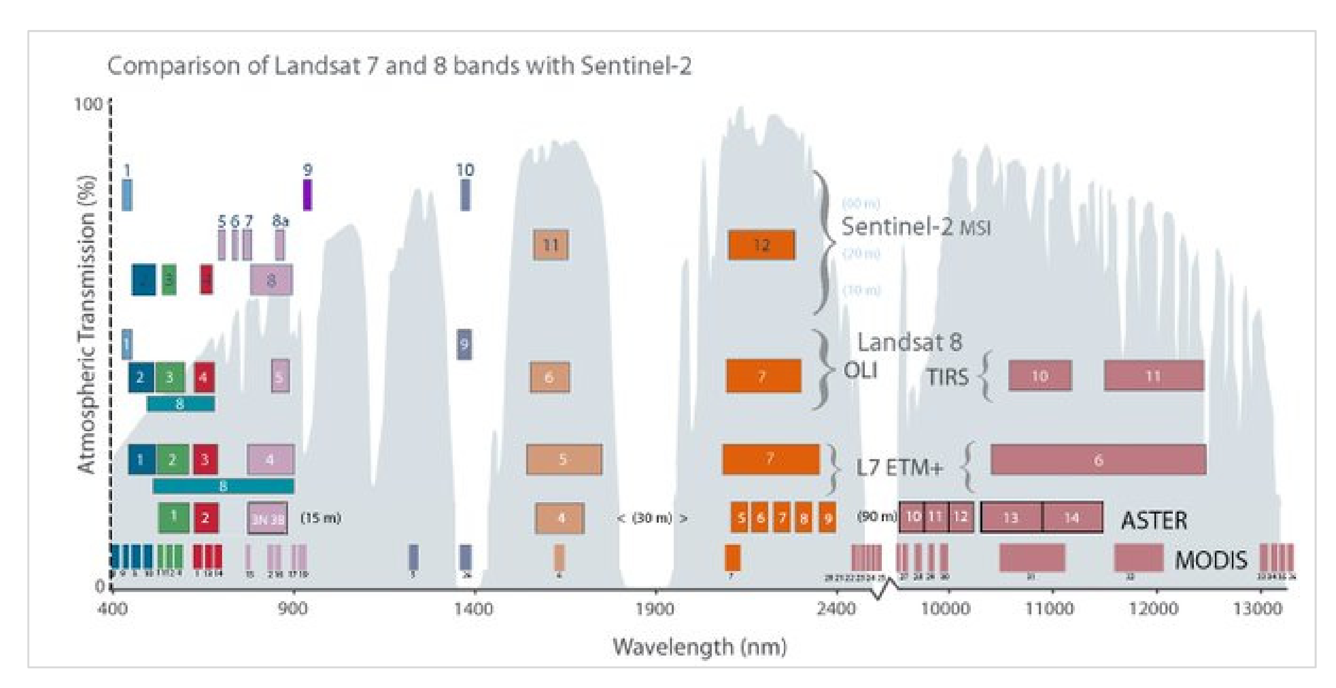


Figura 1. Comparación de las bandas de los sensores MSI, Sentinel-2, OLI y *Thermal Infrared Sensor*, TIRS, Landsat-8, *Enhanced Thematic Mapper Plus*, ETM+, Landsat-7, ASTER y MODIS. Las bandas del espectro visible se muestran en azul, verde y rojo, las de IRc en lavanda, el IRoc 1 en beige y el IRoc 2 en naranja. Fuente: https://twitter.com/usgslandsat/status/837696716417687553?lang=en

Las zonas de estudio se sitúan en Cataluña (España) y en Iowa (EEUU). En cada una de ellas se ha analizado una imagen del sensor MSI de la constelación Sentinel-2, nivel L1C y los mapas de cubiertas del suelo de las dos áreas de estudio.

En Cataluña se ha utilizado una imagen de la tesela 31TCG, adquirida el 05-07-2017, (Figura 2) y el Mapa de Usos y Cubiertas del Suelo de Cataluña de 2017 versión 3, MUCSC 2017 v.3 (Figura 3) elaborado por Grumets, CREAF y GenCat.

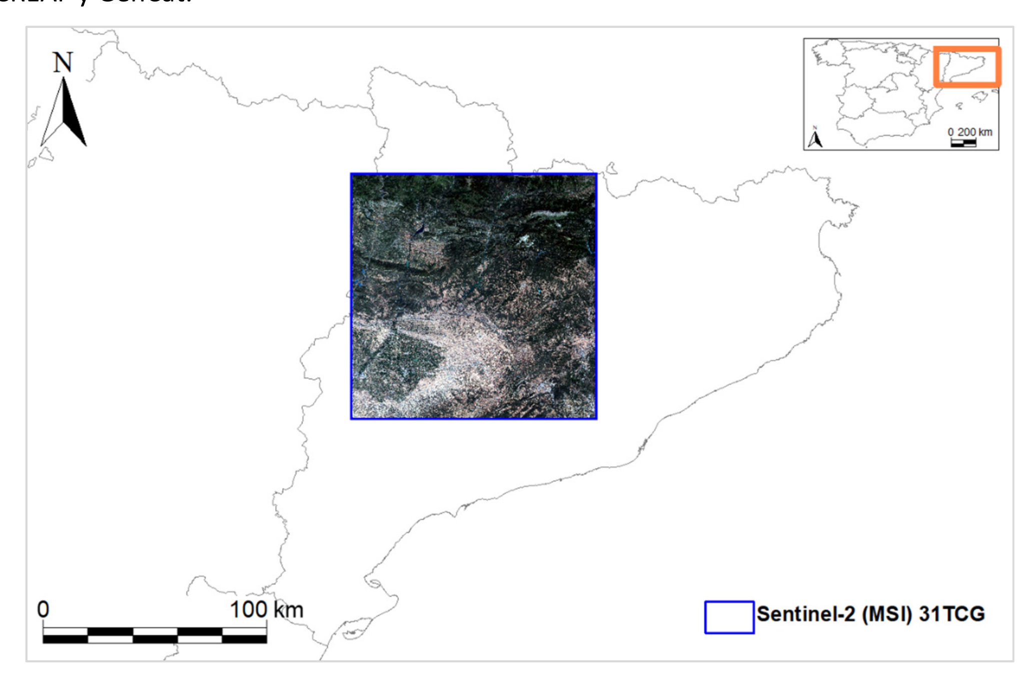


Figura 2. Imagen de satélite estudiada en Cataluña: Sentinel-2 (MSI) de la tesela 31TCG, delimitada en azul. Sistema de Referencia Horizontal: UTM-31N ETRS89. Coordenadas del mapa: X,Y mín: 154 000, 4 481 000; X,Y máx: 597 000, 4 766 000

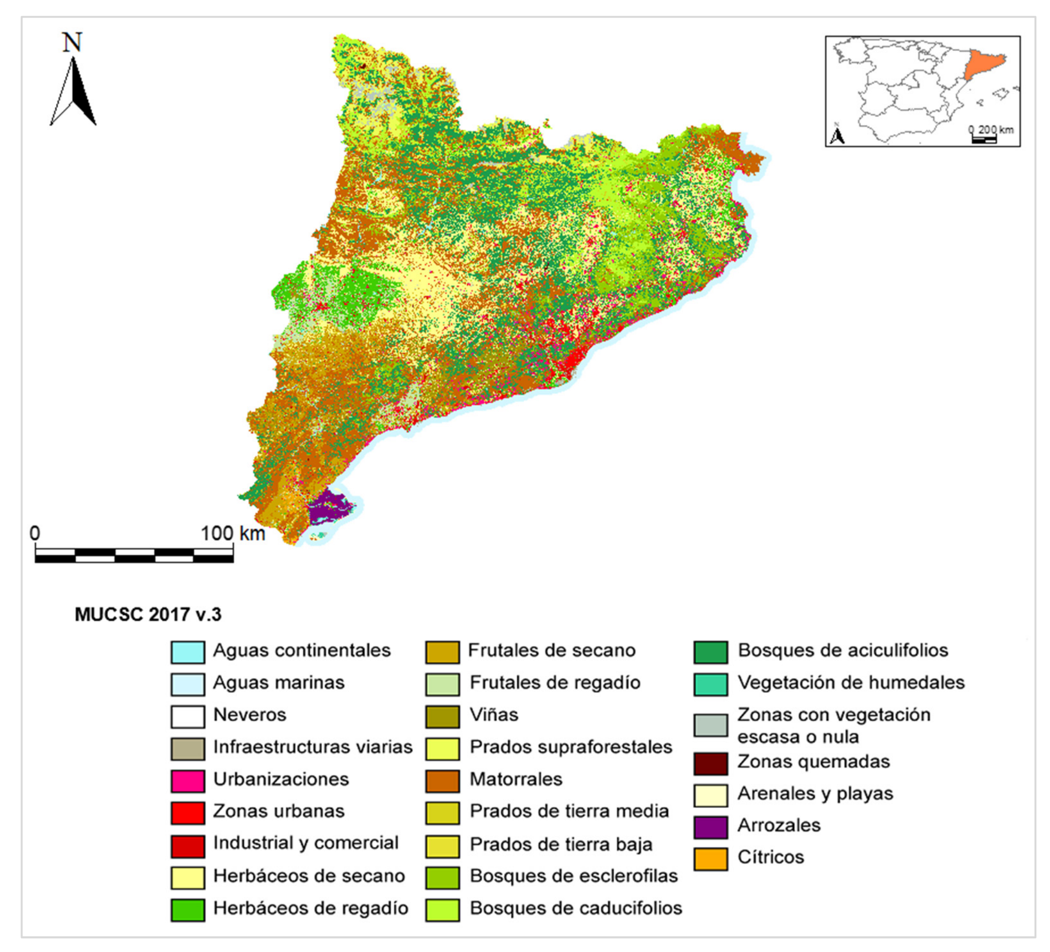


Figura 3. Mapa de usos y cubiertas de Cataluña 2017 v3. Fuente: Grumets-CREAF-GenCat. Sistema de Referencia Horizontal: UTM-31N ETRS89. Coordenadas del mapa: X,Y mín: 153 000, 4478 000; X,Y máx: 656 000, 4762 000.

En el estado de Iowa también se ha estudiado una imagen de Sentinel-2B, MSI, de la tesela 15UTG, adquirida el 22-08-2021 (Figura 4). Además, se ha utilizado el mapa de cultivos *Cropland Data Layer* correspondiente al año 2021 publicado por *United States Department of Agriculture*, USDA (Figura 5).

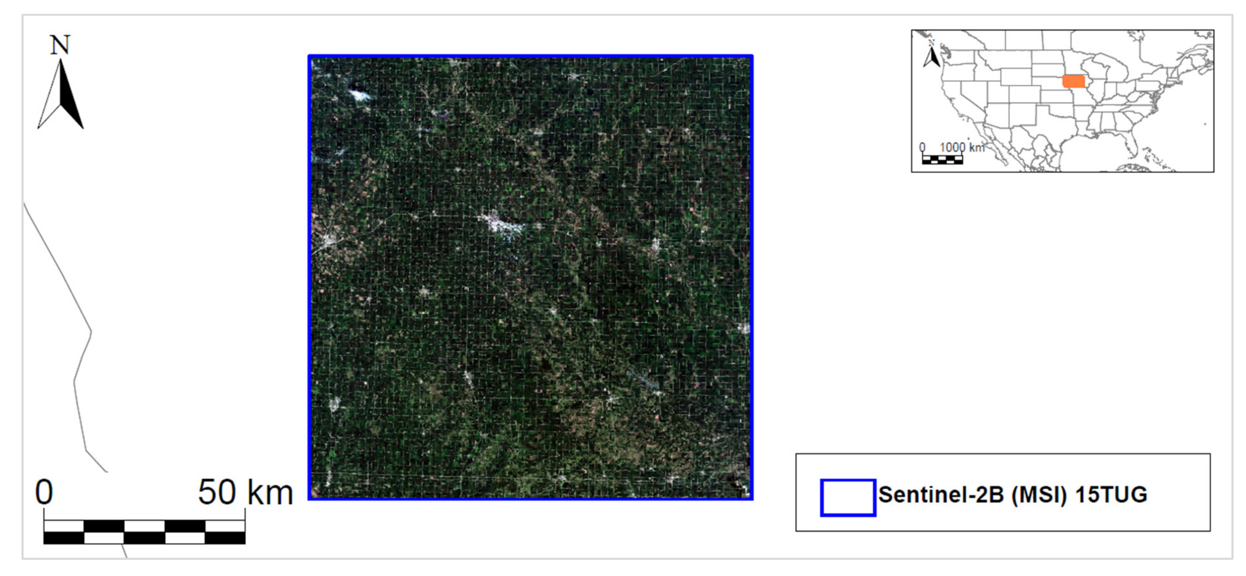


Figura 4. Imágenes de satélite estudiadas en Iowa (EEUU). Imagen de Sentinel-2 (MSI) de la tesela 15TUG, delimitada en azul, y Sistema Horizontal de Referencia: UTM15N - NAD183. Coordenadas del mapa: X,Y mín: 229 000, 4 575 000; X,Y máx: 530 000, 4 712 000.

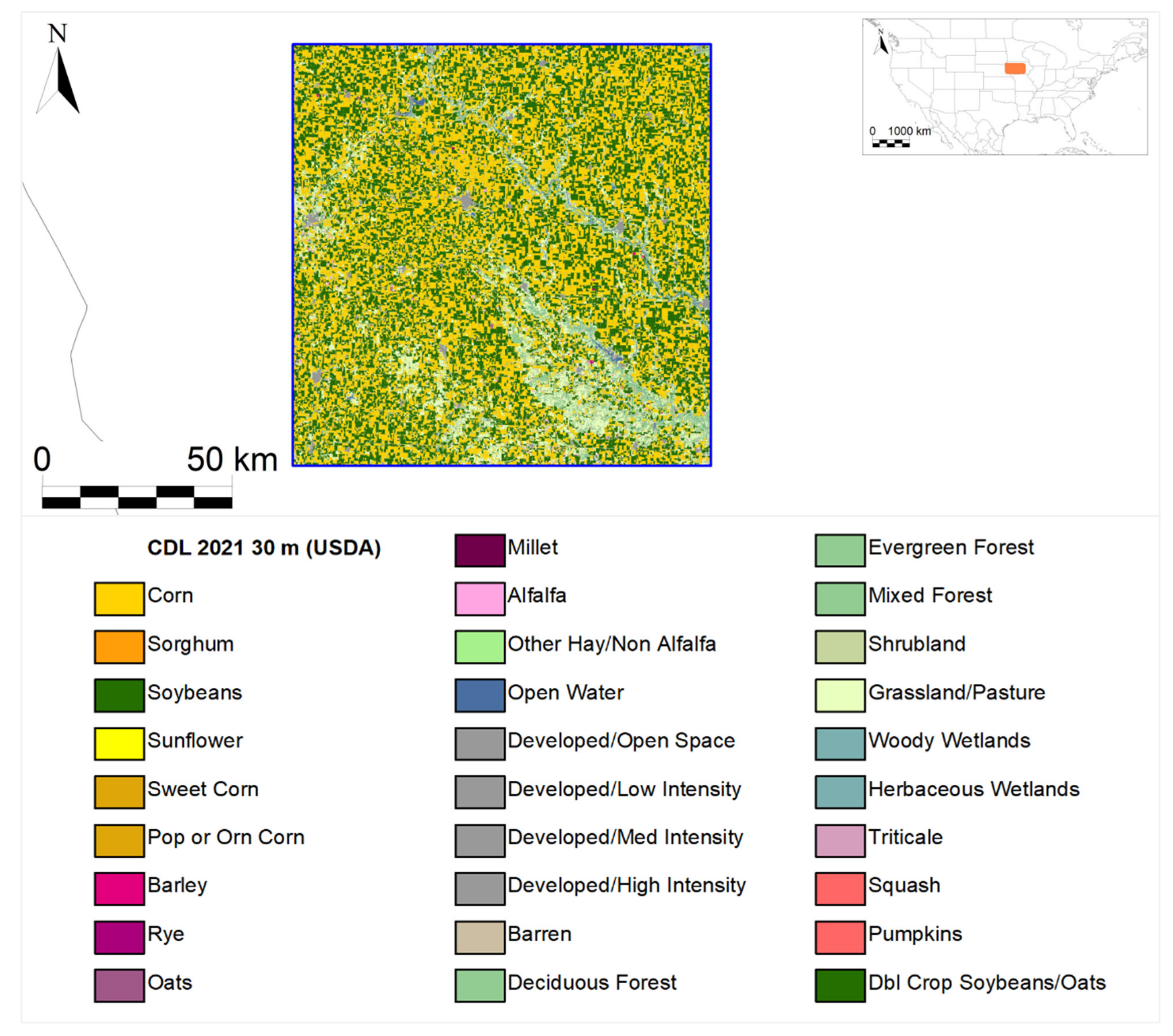


Figura 5. Mapa de cultivos del 2021, USDA, de la zona de estudio. En la leyenda únicamente se muestran los cultivos presentes en la zona de interés. Fuente: *Cropland Data Layer 2021*, USDA. Sistema de Referencia Horizontal: UTM-15N NAD183. Coordenadas del mapa: X,Y mín: 229 000, 4 575 000; X,Y máx: 530 000, 4 712 000.

Los principales programas utilizados en este estudio han sido el SIG MiraMon (Pons, 2004) para analizar y procesar las imágenes, y Microsoft Excel para algunos cálculos adicionales. Para facilitar la reproductibilidad de esta investigación se han citado entre corchetes los nombres de los módulos utilizados en cada parte del proceso.

3. MÉTODOS

El análisis de la correlación de las bandas del VIS y del IRc respecto de las bandas del IRoc en cada imagen se ha centrado principalmente en 3 fases; 1ª el cálculo de la regresión lineal múltiple, 2ª la generación de las bandas sintéticas del IRoc y la determinación de su exactitud y 3ª la variabilidad de dicha exactitud en función de los tipos de cubiertas de suelo (Figura 6). Para evitar incoherencias en la última fase, previamente se han enmascarado las nubes presentes en las imágenes.

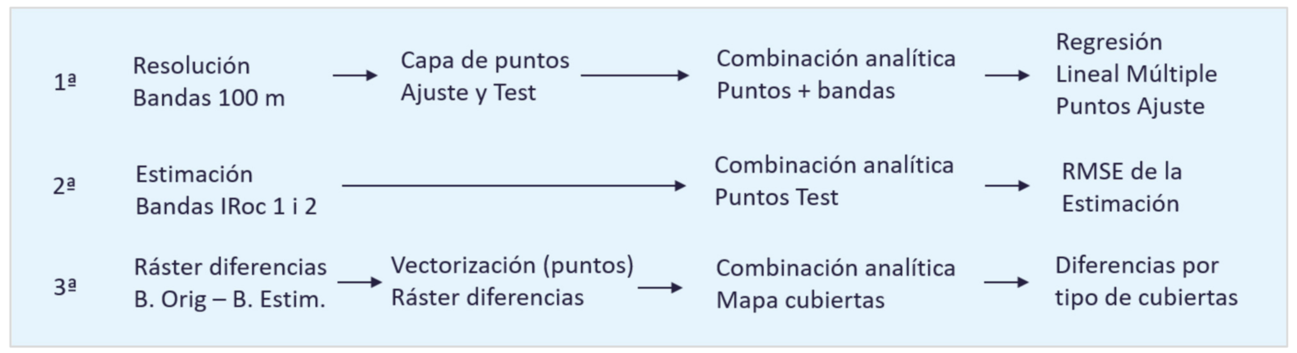


Figura 6. Esquema del método de análisis de la relación entre las bandas de IRoc i las VIS-IRc en imágenes de Sentinel-2 (MSI) compuesto por 3 fases.

3.1. Regresión lineal Múltiple

En primer lugar, se ha ejecutado una regresión lineal múltiple de las bandas VIS y IRc respecto de las bandas IRoc para obtener los coeficientes de correlación (R), el de determinación (R^2), el *Root Mean Square Error*, RMSE, y los coeficientes de las variables explicativas [MiraD_64].

Se han utilizado las bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 8a, para el VIS-IRc y las bandas 11 (IRoc 1) y 12 (IRoc 2). El procedimiento aplicado ha consistido en la unificación de la resolución espacial de todas las bandas a 20 m (usando la media) y, *a posteriori*, a 100 m (seleccionando el valor central), con lo que se ha obtenido la mejor radiometría posible a partir de los datos descargados [DensRas y CanviRes]. Para generar la capa de puntos, se ha vectorizado una de estas bandas a 100 m [IMGPNT]. Para crear la capa de puntos de ajuste, se han seleccionado aleatoriamente el 70% del total de puntos, y con el 30 % restante se ha generado la capa de puntos de test. A continuación, las capas de puntos de ajuste y de test se han combinado analíticamente [CombiCap] con las bandas mencionadas para obtener una tabla con los valores del píxel de cada banda en cada punto. En la tabla DBF correspondiente a la capa de puntos de ajuste se han realizado dos regresiones lineales múltiples con un nivel de significación del 95% (alfa=0.05), una con las bandas VIS-IRc respecto de la banda IRoc 1 y otra respecto de la banda IRoc 2.

En conjunto, se han realizado 4 regresiones lineales múltiples, 2 por cada zona geográfica.

3.2. Cálculo de las bandas sintéticas IRoc

El cálculo de las bandas sintéticas se ha realizado [CalcImg] a partir los coeficientes de las variables explicativas definidos por las regresiones lineales múltiples en la capa de los puntos de ajuste.

Después las bandas sintéticas se han combinado analíticamente con los puntos de test para validar la exactitud del ajuste en los puntos de test con el cálculo del RMSE.

3.3. Variabilidad de la estimación por tipos de cubiertas del suelo

En esta fase se han restado las bandas de IRoc 1 y 2 originales de las bandas IRoc 1 y 2 sintéticas. El ráster de diferencias resultante se ha vectorizado para trasladar el valor de la resta a una capa de puntos. Finalmente, la capa de puntos se ha combinado analíticamente con el mapa de cubiertas correspondiente para generar una hoja de cálculo con la frecuencia de cada tipo de cubierta en función de cada valor de diferencia.

Para determinar el acierto de la estimación en cada tipo de cubierta, se ha contabilizado la frecuencia de cada cubierta en un rango [-RMSE, +RMSE]. Luego, el valor de esa suma se ha divido, en primer lugar, por el total de frecuencias del tipo de cubiertas en cuestión para obtener el porcentaje respecto de cada cubierta y, en segundo lugar, se ha divido por el total de frecuencias de todos los tipos de cubiertas para visualizar la representatividad de cada tipo de cubierta respecto del conjunto.

4. RESULTADOS

Entre los resultados de los análisis realizados en las imágenes Sentinel-2 nivel 1 en reflectividad TOA destacan los siguientes.

En las regresiones lineales de la 1ª fase, los valores de los coeficientes de correlación (R) son muy

elevados, hasta 0.97 (coeficientes de determinación (R^2) hasta el 0.94). La mayoría de los valores de reflectividad predicha respecto de la real para el IRoc 1 y 2 de las zonas de estudio en Cataluña (Figura 7) y en Iowa (Figura 8), ofrecen un buen ajuste de mínimos cuadrados por encontrarse muy cercanos a la recta de regresión. Según las pruebas realizadas sobre los *outlayers* que se pueden observar en las Figuras 7 y 8, los valores superiores al 1% de reflectividad corresponden a píxeles saturados en superficies poco lambertianas.

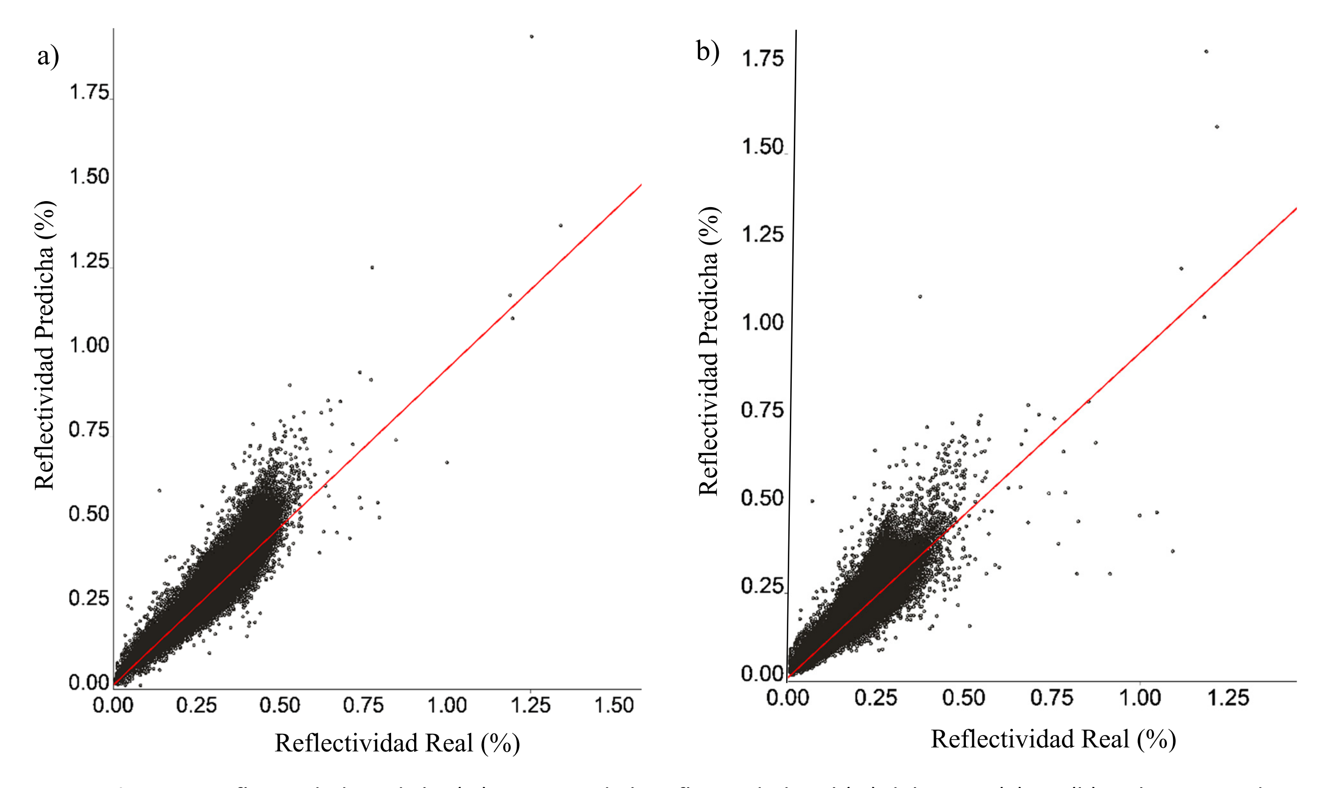


Figura 7. Reflectividad predicha (%) respecto de la reflectividad real (%) del IRoc 1 (a) y 2 (b) en la imagen de Sentinel-2 (MSI) de la tesela 31TCG de la zona de estudio en Cataluña.

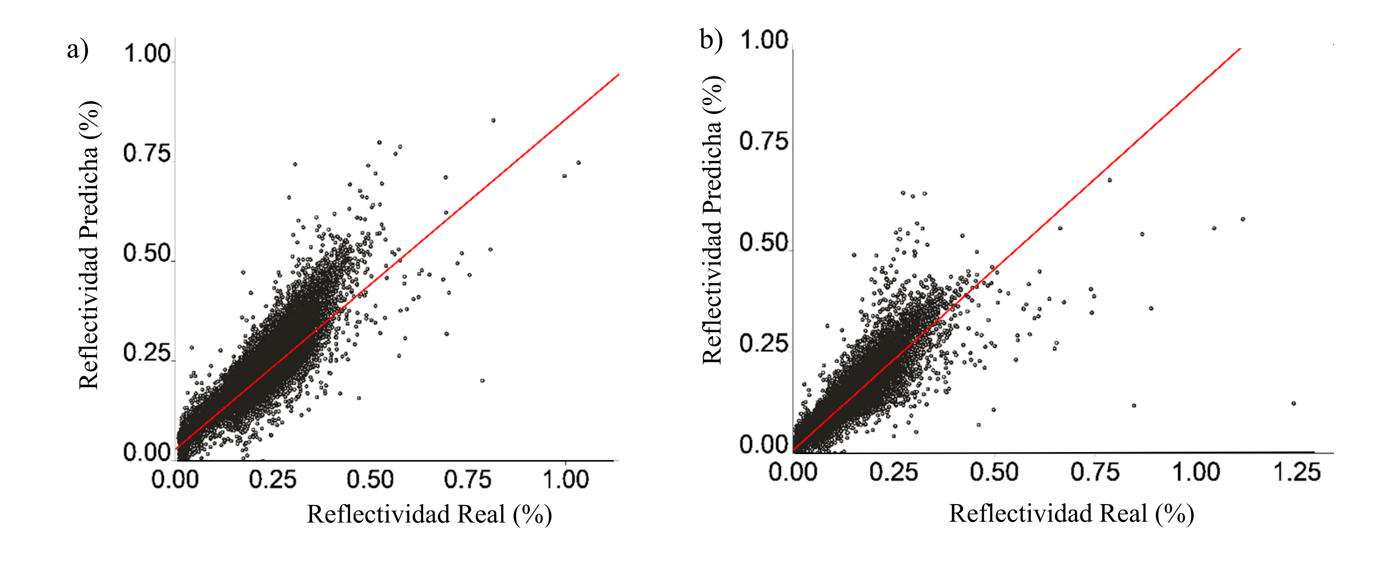


Figura 8. Reflectividad predicha (%) respecto de la reflectividad real (%) del IRoc 1 (a) y 2 (b) en la imagen de Sentinel-2 (MSI) de la tesela 15TUG de la zona de estudio en Iowa.

En la calidad de la estimación correspondiente de la 2ª fase, el menor RMSE para las imágenes de Sentinel-2 resulta en 0.94 (datos en Reflectividad TOA, en %).

En el acierto de la estimación según los tipos de cubierta de la 3ª fase, la frecuencia en el conjunto de todos los tipos de cubiertas en que la diferencia entre la banda original y la banda sintética se sitúa en el

rango de valores definido por [-RMSE, +RMSE] llega hasta el 84.32 % en las cubiertas más representadas y/o con mejor correlación. El tipo de cubierta con un mayor porcentaje de las diferencias dentro del rango definido por [-RMSE, +RMSE] y también de las más representadas, es el de bosques de aciculifolios, 90.41 %, en Cataluña y el de maíz, 94.49 % en Iowa.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Los resultados invitan a considerar la posibilidad de generar bandas sintéticas del IRoc a partir de las bandas VIS-IRc de las imágenes multiespectrales adquiridas desde un UAS con el fin de obtener aproximaciones que puedan ser útiles para el cálculo de índices, o para la calibración de las imágenes satelitales, a falta de otros datos. Incluso se podría focalizar la estimación en función del tipo de cubierta, estrategia que podría resultar de interés en agricultura de precisión, por ejemplo.

Futuros trabajos utilizarán imágenes satelitales corregidas atmosféricamente mediante el método de Áreas Pseudoinvariantes, PIA, (Padró et al., 2017) o mediante medidas *in situ,* RTM, etc., para obtener los resultados en reflectividad a nivel de superficie (BOA, por sus singlas en inglés). Además, se ampliarán el análisis a más zonas con distintos tipos de cubierta y más épocas del año, e incluso a otros sensores, como el OLI de Landsat, a fin de estudiar la posibilidad de generalizar la relación entre las bandas del IRoc y las del VIS-IRc.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo cuenta con el soporte del Ministerio de Ciencia e Innovación y Universidades del Gobierno de España (MCIU) [número de ayuda PRE2019-088093] a Núria Cartes. También ha sido parcialmente financiado por el Gobierno Catalán mediante la ayuda (SGR2017-1690) y por el MCIU a través del proyecto de investigación NEWFORLAND (RTI2018-099397-B-C21, MCIU/AEI/ERDF, EU). Xavier Pons fue beneficiario del premio ICREA Academia. Algunos de nuestros colegas del Grupo de Investigación GRUMETS (UAB y CREAF) han realizado interesantes aportaciones a este trabajo.

6. BIBLIOGRAFÍA

Aasen, H., Honkavaara, E., Lucieer, A., & Zarco-Tejada, P. J. (2018). Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: A review of sensor technology, measurement procedures, and data correctionworkflows. *Remote Sensing*, *10*(7), 1–42. https://doi.org/10.3390/rs10071091

Alonso, L., Picos, J., & Armesto, J. (2021). Forest land cover mapping at a regional scale using multi-temporal sentinel-2 imagery and rf models. *Remote Sensing*, *13*(12). https://doi.org/10.3390/rs13122237

Alvarez-Vanhard, E., Houet, T., Mony, C., Lecoq, L., & Corpetti, T. (2020). Can UAVs fill the gap between in situ surveys and satellites for habitat mapping? *Remote Sensing of Environment*, *243*(April 2019), 111780. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111780

Balestrieri, E., Daponte, P., De Vito, L., Picariello, F., & Tudosa, I. (2021). Sensors and measurements for uav safety: An overview. *Sensors*, *21*(24). https://doi.org/10.3390/s21248253

Emilien, A.-V., Thomas, C., & Thomas, H. (2021). UAV & satellite synergies for optical remote sensing applications: A literature review. *Science of Remote Sensing*, *3*(February), 100019. https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100019

Gomez, C., Adeline, K., Bacha, S., Driessen, B., Gorretta, N., Lagacherie, P., … Briottet, X. (2018). Sensitivity of clay content prediction to spectral configuration of VNIR/SWIR imaging data, from multispectral to hyperspectral scenarios. *Remote Sensing of Environment*, *204*(October 2017), 18–30. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.047

González-Guerrero, O., & Pons, X. (2020). The 2017 land use/land cover map of catalonia based on sentinel-2 images and auxiliary data. *Revista de Teledeteccion*, *2020*(55), 81–92. https://doi.org/10.4995/raet.2020.13112

Huo, L., Persson, H. J., & Lindberg, E. (2021). Early detection of forest stress from European spruce bark beetle attack, and a new vegetation index: Normalized distance red & SWIR (NDRS). *Remote Sensing of Environment*, *255*(December 2020), 112240. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112240

Jafarbiglu, H., & Pourreza, A. (2022). A comprehensive review of remote sensing platforms, sensors, and applications in nut crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, *197*(July 2021), 106844.

https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106844

Jarocińska, A., Kopeć, D., Kycko, M., Piórkowski, H., & Błońska, A. (2022). Hyperspectral vs. Multispectral data: Comparison of the spectral differentiation capabilities of Natura 2000 non-forest habitats. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *184*(September 2021), 148–164. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.12.010

Liu, S., Zheng, Y., Dalponte, M., & Tong, X. (2020). A novel fire index-based burned area change detection approach using Landsat-8 OLI data. *European Journal of Remote Sensing*, *53*(1), 104–112. https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1738900

Mishra, G., Panda, B. K., Ramirez, W. A., Jung, H., Singh, C. B., Lee, S. H., & Lee, I. (2022). Application of SWIR hyperspectral imaging coupled with chemometrics for rapid and non-destructive prediction of Aflatoxin B1 in single kernel almonds. *Lwt*, *155*(December 2021), 112954. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112954

Misra, G., Cawkwell, F., & Wingler, A. (2020). Status of phenological research using sentinel-2 data: A review. *Remote Sensing*, *12*(17), 10–14. https://doi.org/10.3390/RS12172760

Padial-Iglesias, M., Ninyerola, M., Serra, P., González-Guerrero, Ò., Espelta, J. M., Pino, J., & Pons, X. (2022). Driving Forces of Forest Expansion Dynamics across the Iberian Peninsula (1987–2017): A Spatio-Temporal Transect. *Forests*, *13*(3). https://doi.org/10.3390/f13030475

Padró, J. C., Carabassa, V., Balagué, J., Brotons, L., Alcañiz, J. M., & Pons, X. (2019). Monitoring opencast mine restorations using Unmanned Aerial System (UAS) imagery. *Science of the Total Environment*, *657*, 1602–1614. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.156

Padró, J. C., Muñoz, F. J., Ávila, L. Á., Pesquer, L., & Pons, X. (2018). Radiometric correction of Landsat-8 and Sentinel-2A scenes using drone imagery in synergy with field spectroradiometry. *Remote Sensing*, *10*(11). https://doi.org/10.3390/rs10111687

Padró, J. C., Muñoz, F. J., Planas, J., & Pons, X. (2019). Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *75*(July 2018), 130–140. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.018

Padró, J. C., Pons, X., Aragonés, D., Díaz-Delgado, R., García, D., Bustamante, J., … Lange, M. (2017). Radiometric correction of simultaneously acquired Landsat-7/Landsat-8 and Sentinel-2A imagery using Pseudoinvariant Areas (PIA): Contributing to the Landsat time series legacy. *Remote Sensing*, *9*(12). https://doi.org/10.3390/rs9121319

Pons, X. 2004. MiraMon. Geographic Information System and Remote Sensing Software. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAF. Bellaterra. Avaliable online: https://www.miramon.cat/mus/cat/index.htm (accesed on 15 June 2022)

Pucher, C., Neumann, M., & Hasenauer, H. (2022). An Improved Forest Structure Data Set for Europe. *Remote Sensing*, *14*(2). https://doi.org/10.3390/rs14020395

Soares, C., Silva, J. M. N., Boavida-Portugal, J., & Cerasoli, S. (2022). Spectral-Based Monitoring of Climate Effects on the Inter-Annual Variability of Different Plant Functional Types in Mediterranean Cork Oak Woodlands. *Remote Sensing*, *14*(3). https://doi.org/10.3390/rs14030711

Sonnentag, O., Hufkens, K., Teshera-Sterne, C., Young, A. M., Friedl, M., Braswell, B. H., … Richardson, A. D. (2012). Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, *152*(1), 159–177. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.009

Zhang, M., Wang, X., Shi, C., & Yan, D. (2019). Automated Glacier Extraction Index by Optimization. *Water*, *l*, 1–24.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 227-236

Inventario de emisiones de alta resolución espacial y temporal para el análisis del transporte urbano

F. Del-Busto[1]

[1] *Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos CIRCE, 50018, Zaragoza, España.*

dfbusto@fcirce.es

RESUMEN: Las ciudades requieren generar medidas de control y de reducción de emisiones de gases contaminantes derivadas del transporte urbano, sector altamente dependiente de los combustibles fósiles. Lo anterior con el fin tanto de reducir la exposición a niveles nocivos de calidad del aire, como de mitigar la contribución al cambio climático. Por un lado, Zaragoza cuenta con un sistema de monitorización y predicción de contaminación atmosférica. Por otro, genera periódicamente el inventario de emisiones dentro del marco del Pacto de los Alcaldes. Para dotar el sistema de predicción con modelos de dispersión, el alcance del inventario requiere obtener las emisiones con una resolución espacial de 100x100m^2 y con una resolución temporal de 1 hora. El objetivo de este estudio es presentar la metodología basada en un Sistema de Información Geográfica para la elaboración de un inventario de emisiones de alta resolución espacial y temporal para el transporte urbano de la ciudad. Se presentan los requerimientos para la recolección de la información, la preparación de los datos, el cálculo de las emisiones anuales y su conversión en emisiones horarias geolocalizadas con la resolución requerida. En base a su aplicación en Zaragoza, se discute el potencial de replicación y automatización de esta metodología, respecto a las actualizaciones del inventario requeridas para cumplir con los compromisos de la ciudad para 2030.

Palabras-clave: SIG, inventario de emisiones, movilidad urbana, calidad de aire.

1. Introducción

La medición y control de las emisiones de gases contaminantes es de vital importancia para la gestión urbana, debido al impacto en términos de salud pública que genera la mala calidad de aire y a la necesidad irrefutable de mitigar el cambio climático (European Commission, 2020). En Europa, múltiples ciudades presentan niveles perjudiciales de calidad de aire. Se estima que el 70% de las estaciones de monitorización reportan valores de concentración media anual por encima de lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Como consecuencia, alrededor de 54.000 y 19.400 muertes prematuras se asocian a concentraciones perjudiciales de Dióxido de Nitrógeno (NO2) y de Ozono, respectivamente (European Environment Agency et al., 2020). Asimismo, la emisión continua de Gases Efecto Invernadero (GEI) aumenta la probabilidad de eventos climáticos severos, con impactos irreversibles para la sociedad y el medio ambiente (Field et al., 2014).

Para contrarrestar los efectos negativos de la contaminación atmosférica, las ciudades europeas trabajan en la definición de estrategias y planes para mejorar la calidad del aire (Monteiro et al., 2018; Viana et al., 2020) y de mitigación y adaptación al cambio climático (Commission European et al., 2016; Del-Busto et al., 2022; Lorenzo-Sáez et al., 2022). La implementación y control de estas estrategias se basa en la generación de Inventarios de Emisión de Referencia (IER) y subsecuentes Inventarios de Emisión de Seguimiento (IES), para cuantificar reducciones o adoptar medidas correctivas a tiempo.

Al tratar con un sector difuso, como el transporte urbano, uno de los puntos más relevantes es la asignación geoespacial de las emisiones y su evolución temporal (Pisoni et al., 2019). En especial, por los niveles de contaminación a los que pueden estar expuestos los transeúntes debido al tráfico vehicular (Ramacher & Karl, 2020). También, para identificar las medidas más efectivas para reducir las emisiones de la movilidad urbana como, por ejemplo, la electrificación de la flota vehicular o la implementación de Zonas de Emisiones Bajas (ZEB) ambientales (Lugon et al., 2022; Tarriño-Ortiz et al., 2022). La experiencia en diversas ciudades europeas demuestra que la implementación de sistemas de gestión basados en

tecnologías, que además faciliten la comunicación de índices de calidad de aire, promueven un cambio de comportamiento que impactan positivamente la reducción de emisiones (Rodrigues et al., 2021).

En este sentido, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta útil para analizar la representatividad espacial de gases contaminantes, para evaluar la calidad del aire a nivel urbano (Righini et al., 2014), para cuantificar las emisiones del tráfico urbano (Gómez et al., 2018), o para la generación de software para la construcción de inventarios de emisión geolocalizados (Gkatzoflias et al., 2013). Estas experiencias ponen en evidencia las ventajas y beneficios de los SIG en términos analíticos y para la toma de decisiones informadas.

Dentro de este contexto, La ciudad de Zaragoza, como firmante del Pacto de los Alcaldes (CoM por sus siglas en inglés), contribuye activamente a los objetivos Europeos de mitigación y adaptación del Cambio Climático (Ayuntamiento de Zaragoza, 2021). Zaragoza reporta cada dos años el IES para determinar la reducción de emisión de GEI alcanzada respecto al IER de 2005. En línea con la guía oficial del CoM (Commission European et al., 2018), los sectores incluidos en este reporte son el sector residencial, los edificios institucionales y terciarios, y el sector transporte.

Respecto a la calidad del aire, la ciudad cuenta con el Sistema de Predicción de la Contaminación Atmosférica de Zaragoza (PRECOZ) que permite generar mapas de predicción de niveles de horarios de concentración esperada para contaminantes atmosféricos como Óxidos de Nitrógeno (NOx) y Material Particulado ($PM_{2,5}$). Actualmente, se encuentra en desarrollo la segunda versión del PRECOZ que incluirá modelos de dispersión a nivel de calle. Para dotar este sistema con la información requerida, el IES de 2019 se construye como un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permite conocer la localización del foco emisor con una resolución espacial de 100mX100m y una resolución temporal horaria para días laborales y no laborales según los diferentes meses del año.

En este sentido, este estudio tiene por objetivo presentar la metodología aplicada para construir un inventario de emisiones georreferenciado con alcance 1 y 2 del transporte urbano. Este sector difuso es responsable de la emisión del 38% de GEI en Zaragoza, respecto a los sectores reportados al Pacto de los Alcaldes (Ayuntamiento de Zaragoza, 2021). Para cumplir este fin, el presente documento se organiza de la siguiente manera. En la sección 2, se presenta la metodología compuesta por 4 pasos: la recolección de información relativa al factor de actividad, la preparación de los datos con el SIG, el cálculo de las emisiones y el reporte a nivel de los resultados compatible con lo requerido por el PRECOZ. El resultado de la aplicación de la metodología se presenta en la sección 3, mientras que su potencial de replicación y automatización se discuten en la sección 4. Finalmente, la sección 5 resume las principales conclusiones de este estudio.

2. METODOLOGÍA

Como se presenta en la Tabla 1, se diseña una metodología de 4 etapas para poder estimar las emisiones asociadas a la movilidad urbana, en línea con los requisitos de la herramienta PRECOZ. Esto incluye el cálculo de las emisiones de GEI (CO_2, CH_4 y N_2O) y de los principales contaminantes atmosféricos (CO, NO_x, $PM_{2.5}$, entre otros) según lo dispuesto por la guía europea de inventario de emisiones (European Environment Agency, 2019) y con una resolución espacial de 100x100 m^2 y una granularidad horaria.

Tabla 1. Metodología

Etapa	*Actividad*
Recolección de datos	▪ Datos provenientes de fuentes oficiales relativos a la movilidad urbana de Zaragoza: datos de actividad transporte público, datos de actividad transporte privado, y cartografía vectorial de la infraestructura y servicios de transporte.
Preparación de datos en SIG	▪ Construcción del Sistema de Información Geográfica. Unidad de análisis: celdas de 100x100m^2. ▪ Cálculo de la distancia recorrida anualmente por el transporte público a nivel de celda. ▪ Cálculo de la distancia recorrida anualmente por el transporte privado a nivel de celda.
Cálculo de emisiones anuales	▪ Caracterización de la flota vehicular. ▪ Cuantificación de los factores de emisión. ▪ Construcción de la base de datos de emisiones anuales a nivel de cuadricula.
Inventario de alta resolución	▪ Cuantificación y aplicación de factores temporales para el cálculo de emisiones horarias. ▪ Reporte y visualización de resultados.

2.1. Recolección de datos

Como se muestra en la Tabla 2, el presente estudio realiza un análisis ex post facto en base a datos de movilidad urbana de 2019. La información utilizada proviene de fuentes oficiales de información. Se trata, en gran medida, de datos recolectados por los servicios técnicos del Ayuntamiento de Zaragoza, complementada con información generada por entidades nacionales. Tres tipos de variables se incluyen dentro de la recolección de información.

Primero, la información relativa a la operación del transporte público de Zaragoza, que incluye las 44 líneas urbanas, las 19 líneas metropolitanas y la línea 1 del tranvía. Para cada una de las líneas, se conoce la distancia total recorrida a lo largo de 2019. También, se recolecta información acerca de las tecnologías EURO, autobuses híbridos y eléctricos que componen la flota vehicular, así como las líneas donde operan los autobuses de baja emisión.

Segundo, el volumen de vehículos que se registran cada hora en las 22 estaciones de aforo permanente y de los 65 aforos de cobertura realizados durante 48h a lo largo del año. Esta información es complementada con la Intensidad Media Diaria (IMD) de las autovías y carreteras reportados en el Mapa de Tráfico de 2019 (MITMA, n.d.). Al igual que con el transporte público, se caracteriza el parque vehicular privado según el tipo de vehículo, la tecnología de propulsión y el combustible utilizado.

Por último, se obtiene la cartografía vectorial relativa a los servicios e infraestructuras de transporte de la ciudad. Se trata, por un lado, del recorrido de cada línea de autobús y de la línea 1 de tranvía y, por otro, de la red de vías urbanas e interurbanas dentro del término municipal de Zaragoza. Además, se cuenta con la localización de cada una de las estaciones de aforo y con la distribución de la población a escala de sección censal, según la población el padrón municipal a enero de 2019.

Tabla 2. Descripción de la información recolectada

Tipo de variable	Descripción	Fuente
Datos de actividad transporte público.	Distancias anuales recorridas por línea, caracterización de la flota vehicular (antigüedad y tecnología), horarios de operación por línea, velocidad media de operación, consumos energéticos	Datos abiertos de Zaragoza, Servicio de Movilidad Urbana, CTAZ.
Datos de actividad transporte privado.	Aforos vehiculares de las estaciones temporales y permanentes, caracterización de la flota vehicular (tipo de vehículo, tecnología y antigüedad), intensidad media diaria en circunvalaciones, indicadores de movilidad.	Datos abiertos de Zaragoza, Servicio de Movilidad Urbana. PMUS Zaragoza.
Cartografía vectorial	Rutas de transporte público urbano, rutas de transporte público metropolitano, localización de las estaciones de aforo, distribución de la población por Sección Censal.	Servicio de Movilidad Urbana, CTAZ, Catastro, OSM, MITMA.

2.2. Preparación de datos en SIG

Pare el reporte geolocalizado de los resultados, antes de iniciar con los cálculos de consumos energéticos y de emisiones contaminantes, se prepara toda la información base dentro del SIG. Se construye un proyecto compuesto básicamente por la red de vías dentro del término municipal, categorizadas en vías de baja velocidad (residenciales de menos de 30 km/h), de media velocidad (vías urbanas de máximo 50 km/h) y de alta velocidad (carreteras y autovías de más de 50 km/h).

Además, se genera la cuadricula de análisis con un espaciado horizontal de 100 m y un espaciado vertical de 100 m. Para reducir el procesamiento de información, se seleccionan aquellas celdas que coinciden con las vías de tráfico mixto. Con esto se reduce la necesidad de acumular información a tan solo 11.000 celdas de las 270.000 que componen la cuadricula original.

En el caso del transporte público, se superponen dentro del proyecto SIG, cada una de las rutas de transporte público, de tal manera que coincidan con las calles que transitan. Para cada celda, se realiza una sumatoria de los metros recorridos por cada línea dentro de la celda, que servirán para el cálculo del factor de actividad de la etapa siguiente de la metodología.

De manera similar, para el transporte privado, se realiza una sumatoria de los metros de vía que se localiza dentro de cada una de las celdas. También, se construye una base de datos geolocalizada para la Intensidad Media Diaria Laboral (IML) de cada una de las vías analizadas. Se trata de tres tipos diferentes de

cálculo, como se presenta a continuación:

1. Para aquellas vías reportadas dentro del mapa de tráfico nacional, se calcula IMD de acuerdo con el alcance del inventario. No se tiene en cuenta el tráfico de paso, solamente aquel que ocurre dentro del término municipal.
2. Para las vías aforadas por las estaciones permanentes y de cobertura de Zaragoza, se procede a calcular la IML en base a los datos registrados durante 2019. Mediante un proceso iterativo, se otorga el nivel de tráfico a cada vía principal de la ciudad. Ya que cada estación de aforo se localiza sobre un tramo de vía, primero, se asigna el valor de la IML a cada tramo. Esto da lugar a una red incompleta incompatible con lo requerido por el sistema PRECOZ. Para completar la red, se verifica: (1) que el nodo final del tramo aforado corresponda con el nodo inicial del siguiente tramo, (2) que el siguiente tramo identificado no corresponda a otra vía (por ejemplo, en cruce de calles o bifurcaciones) y (3) que el siguiente tramo identificado mantenga las mismas condiciones de circulación (cambio de sentido o inicio de vía peatonal, por ejemplo). Lo anterior supone un procesamiento iterativo de la información en SIG, cuyo resultado final se muestra en el 'mapa de aforos a nivel de vía' de la Figura 1.
3. Finalmente, para las vías sin aforo, que son principalmente calles en zonas residenciales, en polígonos industriales y en barrios rurales, se calcula el número de viajes generado en cada sección censal, en base a los 0,704 viajes por habitante al día en vehículo privado registrados en 2017. En caminos, se considera que el volumen vehicular se reduce en al menos un 70% respecto a vías residenciales.

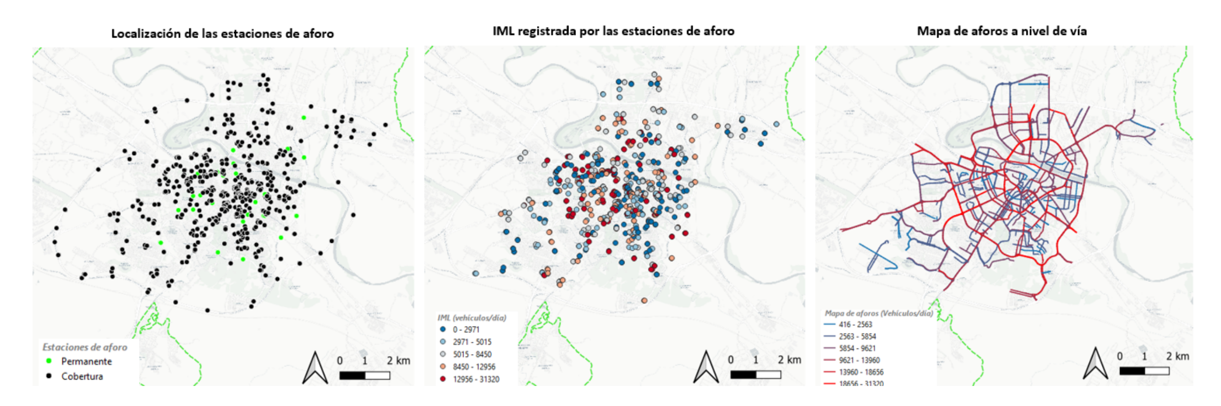


Figura 1. Construcción del mapa de aforos de 2019

$$VKT_{j,j} = \sum \quad F_{IML} * 365\ días * IML_i * LONG_{i,j} \qquad (1)$$

Con esta información, se cuantifica para cada una de las celdas de análisis los kilometro-vehículo recorrido (VKT) anualmente siguiendo la ecuación (1), donde:

- VKT_j corresponde a los kilómetros-vehículo recorridos al año en la celda j;
- IML_i corresponde a la IML de la vía i en vehículos por día;
- $LONG_i$ corresponde a la longitud de la vía i dentro de la celda j en kilómetros; y
- F_{IML} corresponde al factor de día laboral a día natural. Se adopta un factor de 0,9.

2.3. Cálculo de emisiones anuales

Para el cálculo de los factores de emisión, se sigue el método de nivel 3 para el transporte de carretera, que depende tanto de la distancia total recorrida para cada tecnología de propulsión y tipo de combustible, como de la velocidad promedio de los vehículos (European Environment Agency, 2019). Por otro lado, se divide a los contaminantes en aquellos cuyos factores de emisión dependen únicamente de la distancia recorrida (CH4, N2O, NH3, SO2, Pb, entre otros), y aquellos en los que se tiene en cuenta el consumo energético asociado a la velocidad de conducción (NOx, CO, VOC, PM2.5, entre otros).

En términos generales, se supone que todos los vehículos transitan en pendientes planas y con un nivel medio de carga. Para la velocidad de conducción, se utiliza la clasificación de vías de velocidad baja, media y alta descrito en el apartado anterior. Mientras que, para el transporte público, se utiliza el valor aportado por los servicios de movilidad.

Tanto el parque de autobuses como la flota vehicular privada se clasifica según el código Selected

Nomenclature for Air Pollution (SNAP), el combustible utilizado y la tecnología EURO reportada por las fuentes de información. Con los factores de emisión definidos para todos los contaminantes, se cuantifica el consumo de energía térmica y eléctrica, y las emisiones directas e indirectas. Aunque para la herramienta PRECOZ interesa únicamente la emisión directa de contaminantes que pueden afectar la salud humana, el cálculo de los consumos eléctricos y de las emisiones indirectas es necesario para el Plan de Acción por el Clima y la Energía Sostenible (PACES) de la ciudad.

2.4. Inventario de alta resolución espacial y temporal

Finalmente, se construye el inventario de emisiones de alta resolución con el cálculo de las emisiones horarias. Para ello, se determinan tres tipos de factores temporales: (1) mes del año, (2) tipo de día y (3) hora del día.

Para el primer factor temporal, se utiliza la distribución del tráfico urbano mes a mes en base a lo medido por las estaciones permanentes. El reparto es equitativo, alrededor del 8% y el 9% del total de vehículos contabilizados, salvo para el mes de agosto durante el cual este valor se reduce a 6%. Ya que el transporte público no presenta variaciones en su operación durante el año de análisis, no se tiene en cuenta dentro de factor temporal relativo al mes.

Para los diferentes tipos de día, se calcula el promedio diario de la distribución del tráfico privado mensual para las siguientes categorías: Laboral (de lunes a jueves, salvo festivos), Viernes, Sábado, Domingo y Festivo. En el caso del transporte público, se conoce la distancia recorrida por cada línea para cada día de la semana. Con esta información, es posible calcular la distribución promedio diaria para las categorías Laboral, Sábado y Domingo. La operación en días festivos es igual que en domingos. Los viernes se prestan los mismos servicios que durante el resto de los días laborales.

Finalmente, se calcula el factor horario para cada tipología de día. Para la movilidad privada, se calcula el promedio horario en base a los aforos vehiculares. Mientras que, para el transporte público, se tiene en cuenta la variación de la frecuencia de los servicios en diferentes periodos durante el día. Se distinguen 5 periodos: de 6:00 a 0:00 (periodo de mayor operación), de 0:00 a 1:00, de 1:00 a 2:00, de 2:00 a 5:00 (periodo durante el cual operan únicamente las líneas nocturnas) y de 5:00 a 6:00.

El cálculo de los consumos energéticos y las emisiones a nivel horario se realiza para cada celda. En total, se construyen 1.440 bases de datos (12 meses por 5 tipos de día por 24 horas) con valores horarios para el transporte privado, y 15 bases de datos (3 categorías de día por 5 periodos de operación) para el transporte público. Estas bases de datos, con valores horarios segregados espacialmente cada 100X100 m^2, sirven de base para alimentar el modelo de calidad del aire de la herramienta PRECOZ.

3. RESULTADOS

El cálculo de las distancias recorridas, los consumos energéticos y sus consecuentes emisiones se realiza de manera independiente para el transporte público y el transporte privado, debido a las diferencias que presente la información base para cada subsector. Para el transporte público, se consideran los kilómetros recorridos correspondientes a las 64 líneas (1 tranvía y 63 autobuses). Además, se tiene en cuenta la distancia recorrida con tecnologías eléctricas para su reporte dentro del PACES. Se trata del tranvía, que en el año 2019 recorrió 1.324.674 km, y de la línea 38 de Zaragoza que es la única línea que, parcialmente, utiliza de autobuses híbridos enchufables y 100% eléctricos. Del resto de líneas, existen 29 líneas de autobuses que operan, entre otros, con autobuses híbridos no enchufables.

Para el transporte privado, se contabilizan los parámetros de entrada para los vehículos ligeros y pesados. El cálculo del factor de actividad y de los consumos energéticos se realiza para cada tipología de vehículo. En la Tabla 3, se presentan los resultados para el transporte público y el transporte privado, según los códigos SNAP.

A partir de esta información, se cuantifica el consumo energético eléctrico y térmico del transporte. Se considera, además, que la electricidad consumida por el tranvía de Zaragoza y por los autobuses eléctricos enchufables cuenta con Garantía de Origen (GdO) 100% renovable. Al tener un factor de emisión nulo, no se cuantifican emisiones GEI asociadas a estos consumos.

Tabla 3. Kilómetros recorridos y consumo energético anual por tipo de vehículo

Código SNAP*	Tipo de vehículo	Distancia recorrida [km/año]	Consumo energía térmica [MWh/año]	Consumo energía eléctrica [MWh/año]	Peso de los consumos eléctricos [%]
701	Vehículos de pasajeros	175.8132.039	1167.663	1.671	0,14%
702	Vehículos comerciales ligeros	165.569.385	156.153	0	0%
703	Vehículos pesados	189.435.243	368.712	0	0%
	Autobuses	24.431.218	78.034	1.580	2%
704	Ciclomotor y motocicletas	162.356.650	27.901	955	3%
-	Tranvía	1.324.674	0	5.232	100%
*SNAP: *Selected Nomenclature for Air Pollution*					

En línea con el nivel de cálculo 3, se cuantifican los factores de emisión en caliente y en frío en gramos de contaminante por kilómetro recorrido. Este cálculo depende de la velocidad. En el caso del transporte público, se asume una velocidad promedio de 30 km/h en ámbito urbano, mientras que para los vehículos privados se considera 100 km/h para las vías denominadas de alta velocidad (carreteras y autovías) y 30 km/h para las vías de velocidad media y baja. En el caso del CO_2, además, se tiene en cuenta la mejora en emisiones debido a la introducción de biocombustibles E5 y B7 (MITECO, 2021). Con los factores de emisión definidos, se reporta, en la Tabla 4, el inventario de emisión para el año 2019 de los contaminantes incluidos en el estudio, agrupados por subsector.

Tabla 4. Inventario de emisiones para el año 2019

Contaminante	*Transporte público*	*Transporte privado*	*Total*
CO2 [t/año]	18.602,13	428.118,00	446.720,13
CO [t/año]	22,20	1.006,00	1.028,20
SO2 [t/año]	0,12	3,00	3,12
NOx [t/año]	114,23	1.515,00	1.629,23
N2O [t/año]	0,36	16,00	16,36
COVNM [t/año]	1,22	119,00	120,22
CH4 [t/año]	0,12	23,00	23,12
PM2.5 [t/año]	0,92	35,00	35,92
NH3 [t/año]	0,08	55,00	55,08
POPs [t/año]	0,01	1,00	1,01
Carbón Negro - BC [t/año]	0,68	19,00	19,68
C6H6 [t/año]	0,00	6,00	6,00
Pb [t/año]	0,00	9,99E-05	9,99E-05
Cd [t/año]	0,00	1,56E-05	1,56E-05
Hg [t/año]	0,00	9,45E-04	9,45E-04

Una vez generadas las bases de datos anuales y horarias, como se describe en el apartado 3.4, es posible volcar esta información dentro del proyecto SIG para visualización de los resultados. La Figura 2 presenta la distribución de las emisiones anuales de NOx a dos escalas diferentes. Es posible observar como la metodología propuesta cumple con uno de los requisitos del sistema PRECOZ, que es la segregación espacial cada 100x100m^2 para todas la red de vías dentro del término municipal. Se puede apreciar como las mayores concentraciones se localizan en la Z40, vía de circunvalación, donde no habría una exposición directa salvo en el caso de edificios cercanos a esta infraestructura. También, se identifican otros puntos de mayor interés para la toma de medidas de reducción de tráfico, como ciertas rotondas e intersecciones dentro de la ciudad, donde los niveles de emisión son similares a la autovía.

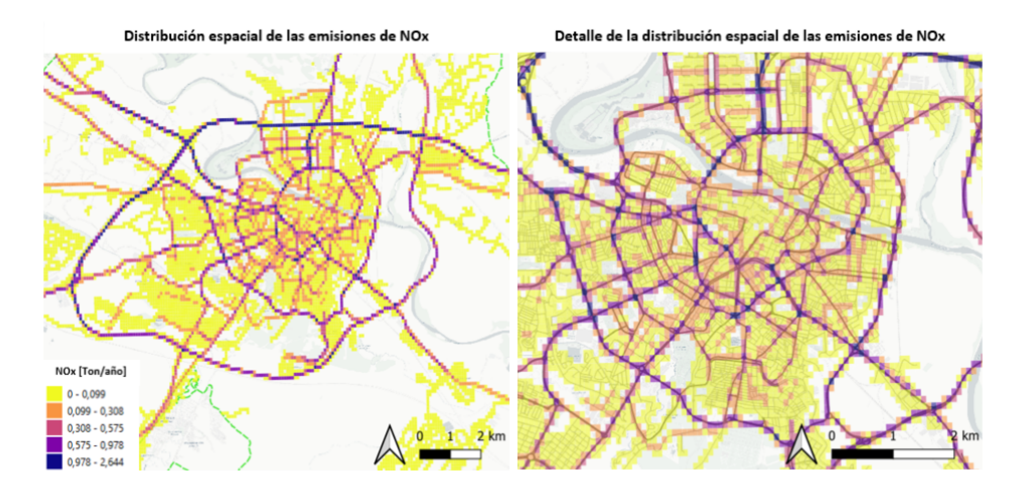


Figura 2. Distribución espacial de las emisiones anuales de NOx

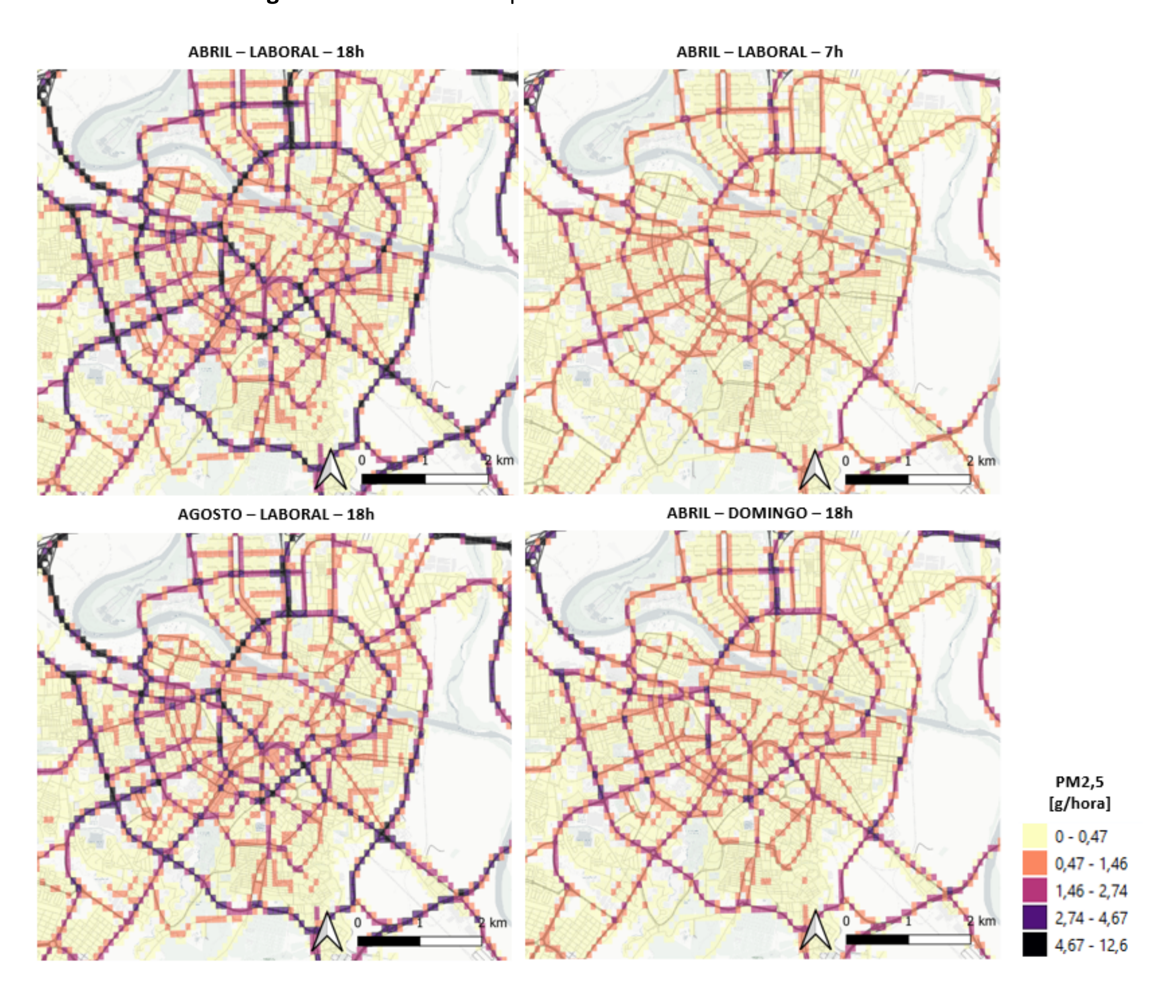


Figura 3. Ejemplo de aplicación de factores horarios a las emisiones de $PM_{2,5}$

Una vez resuelta la localización de las emisiones, se comprueba la información generada a nivel horario. Como presenta la Figura 3, con las bases de datos generadas es posible entender la distribución temporal de las emisiones, en este caso para el $PM_{2.5}$. En la figura se presenta la aplicación de los tres factores temporales calculados para el transporte: Mes, Día (categoría) y Hora. Si se compara la hora punta (18h) durante un día laboral en abril, se puede ver que la reducción del tráfico de agosto tiene poco impacto en las emisiones de toda la ciudad. No obstante, los niveles sí se reducen si la comparación se hace para otra categoría de día, como el domingo, o para una hora de tráfico mínimo como las 7h. En el primer ejemplo, se percibe una ligera reducción al interior de los barrios, mientras las vías principales de la ciudad mantienen niveles medios de emisión. Respecto al segundo ejemplo, es evidente que la ausencia de tráfico a primera

hora de la mañana se refleja en valores bajos de emisión. No obstante, se percibe como las vías de acceso y el segundo cinturón de la ciudad presentan emisiones ligeramente altas.

Tabla 5: Comparación de emisiones de CO_2 entre 2005, 2015 y 2019.

Variable	2005	2015	2019
Emisiones CO_2 - transporte público [t/año]	22.090	18.805	18.602
Variación respecto a 2005 - Transporte público [%]	0%	-15%	-16%
Emisiones CO_2 - transporte privado [t/año]	478.287	505.900	428.118
Variación respecto a 2005 - Transporte privado [%]	0%	6%	-10%

Finalmente, la Tabla 5 presenta la mitigación de emisiones GEI conseguida entre el IER de 2005 y el IES de 2019. A pesar de que Zaragoza cumple con el objetivo de reducir el 20% las emisiones de los sectores de reporte obligatorio al CoM para el año 2020 (Ayuntamiento de Zaragoza, 2021), es posible observar cómo el transporte urbano presenta un desempeño más bajo que el promedio general de la ciudad. El transporte público, responsable del 2% de las emisiones reportadas, apenas logra un 16% de mitigación, mientras que el transporte privado, que contribuye con el 36% de las emisiones, apenas consigue un 10% de reducción. No obstante, los esfuerzos de la ciudad en materia de cambio climático le han permito ser seleccionada para ser una de las primeras 100 ciudades neutras en carbono en 2030.

4. Discusión

En base la prueba realizada para el caso de Zaragoza se puede establecer que la metodología presentada tiene un alto nivel de replicación para otras ciudades. Esto debido a que se basa en datos usualmente recogidos por los gestores urbanos como la caracterización de la flota, aforos automáticos de tráfico y datos de operación del transporte público. El esfuerzo en la recolección de información y la capacidad computacional requeridos dependerán del tamaño de la ciudad, pero teniendo en cuenta el tamaño de Zaragoza, que es de alrededor de 700.000 habitantes, es posible afirmar que la metodología es de aplicación para ciudades medianas y grandes. Asimismo, el potencial de replicación viene dado por la necesidad de las ciudades para realizar inventarios de emisión de manera periódica. Dentro del marco del Pacto de los Alcaldes, este reporte se debe realizar cada 2 años.

No obstante, el estado actual de la metodología requiere de una estandarización que haga más eficiente la ejecución de todo el proceso. En la siguiente iteración para Zaragoza, se tiene planificado crear modelos de procesado en SIG para automatizar los geoprocesos realizados en la etapa 2 de preparación de la información.

Entre las limitaciones que presenta la metodología se encuentra el cálculo indirecto del factor de actividad de las calles que no cuentan con una medición de aforo. Para solventar la falta de información primaria en estas vías, se podría hacer uso de sensores de tráfico móviles o complementar los datos de tráfico con datos provenientes de telefonía móvil. Aunque esto podría aumentar la complejidad de la metodología, el uso de datos masivos podría estar acompañado con una mayor automatización del proceso, al aprovecha las funcionalidades SIG en ambientes de programación como Python.

Aunque esta metodología se desarrolla para alimentar la herramienta de predicción PRECOZ, otra vía de desarrollo de este estudio sería apoyar esta predicción con datos de tráfico en tiempo real. Actualmente, el sistema PRECOZ hace uso de las bases de datos horarias desarrolladas para la realización de sus cálculos y la generación de modelos de dispersión. No obstante, ya que la ciudad cuenta con 22 estaciones de aforo permanente, estos modelos podrían ser continuamente alimentados con información actualizada, con el objetivo de mejorar su eficiencia y poder evitar episodios de contaminación.

5. Conclusiones

El desarrollo continuo de inventarios de emisiones resulta de altísima utilidad para las ciudades europeas, como es posible ver en el caso de Zaragoza. Si bien un inventario de emisión con datos anuales ya es suficiente para cumplir con ciertos compromisos de reporte, el integrar funcionalidades SIG para la generación de inventarios de alta resolución permite también identificar la localización de focos importantes de emisión y tomar medidas correctoras para reducir la exposición a gases contaminantes por parte de la población.

Por un lado, la metodología presentada constituye un avance en la estandarización de un proceso altamente exigente para ciudades de mayor tamaño, que es cada vez más demandado para poder alcanzar los objetivos climáticos a 2030 y 2050 (Commission European et al., 2018). Contar con un inventario de emisiones actualizado y georreferenciado permite a Zaragoza ser una ciudad referente, como lo demuestra su selección como una de las 100 ciudades neutras en carbono, y poder planificar sus estrategias de mitigación en base al desempeño energético y ambiental de las diversas zonas de la ciudad.

Por otro lado, se resalta el potencial de replicación que tiene la metodología para la realización de nuevos inventarios en Zaragoza o para su aplicación en otras ciudades. Además de servir de herramienta de diagnóstico, el resultado permite el diseño, implementación y seguimiento de medidas para la reducción del tráfico y de las emisiones. Se abre una oportunidad para el diseño de Zonas de Emisiones Baja o para la promoción de la movilidad eléctrica basada en información.

En futuras iteraciones de este estudio, se revisará la pertinencia para automatizar la preparación de datos, la realización de cálculos a partir de modelos de procesado SIG, el diseño de programas Ad hoc basados en la interacción SIG-Python y/o la integración de nuevas fuentes de información, como datos provenientes de telefonía móvil. De esta manera, se podrá avanzar en la estandarización de un proceso recurrente para cualquier ciudad que gestione sus emisiones y tenga la intención de implementar medidas de mitigación ante episodios de baja calidad de aire y frente al cambio climático.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado a partir del CONVENIO ENTRE EL AYUNTAMIENTO DE ZARAGOZA Y LA FUNDACIÓN CIRCE PARA EL DESARROLLO DEL PLAN DE ACCIÓN DEL CLIMA Y ENERGÍA SOSTENIBLE (PACES) 2030, Y LA ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIONES con expediente número 417.729/2020. Se agradece a al Servicios de Medio Ambiente y Sostenibilidad y al Servicio de Movilidad Urbana del Ayuntamiento de Zaragoza por la colaboración durante la ejecución del estudio.

7. BIBLIOGRAFÍA.

Ayuntamiento de Zaragoza, CIRCE - Research Centre for Energy Resources and Consumption, Círez, F., Del-Busto, F., Pérez, M., García, C., de la Cueva, I., Reinales, D., Rodríguez, D., Cebrián, C., de Luis, M., López, N., & Campillos, M. L. (2021). *Inventario de Emisiones de Zaragoza. anualidades 2018 y 2019. Sectores PACES*.

Ayuntamiento de Zaragoza, CIRCE - Research Centre for Energy Resources and Consumption, de Luis, M., de Luis, M., Campillos, M. L., Del-Busto, F., Alcalde, E., & Longares, J. M. (2021). *Plan de Acción por el Clima y la Energía Sostenible del Municipio de Zaragoza 2030*. http://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/2021-PACES-Zaragoza-2030.pdf

Commission European, Centre Joint Research, Iancu, A., Monni, S., Muntean, M., Lah, O., Rivas, S., Hernandez, Y., Follador, M., Palermo, V., & Barbosa, P. (2018). *Guidebook "How to develop a Sustainable Energy and Climate Action Plan (SECAP)". Part 2, Baseline Emission Inventory (BEI) and Risk and Vulnerability Assessment (RVA)* (P. Bertoldi (ed.)). Publications Office. https://doi.org/doi/10.2760/118857

Commission European, Centre Joint Research, Kona, A., Melica, G., & Zancanella, P. (2016). *Covenant of Mayors: greenhouse gas emissions achievements and projections*. https://data.europa.eu/doi/10.2790/11008

Del-Busto, F., Mainar-Toledo, M. D., & Ballestín-Trenado, V. (2022). Participatory Process Protocol to Reinforce Energy Planning on Islands: A Knowledge Transfer in Spain. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, *34*, 5–18. https://doi.org/10.54337/IJSEPM.7090

European Commission. (2020). *Commission staff working document impact assessment accompanying the document; communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions stepping up Europe's 2030*.

European Environment Agency. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 : technical guidance to prepare national emission inventories*. Publications Office. https://doi.org/doi/10.2800/293657

European Environment Agency, González Ortiz, A., Guerreiro, C., & Soares, J. (2020). *Air quality in Europe :*

2020 report. https://doi.org/https://data.europa.eu/doi/10.2800/786656

Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., & White, L. L. (2014). Climate change 2014 impacts, adaptation and vulnerability: Part A: Global and sectoral aspects: Working group II contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects*. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379

Gkatzoflias, D., Mellios, G., & Samaras, Z. (2013). Development of a web GIS application for emissions inventory spatial allocation based on open source software tools. *Computers & Geosciences*, *52*, 21–33. https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2012.10.011

Gómez, C. D., González, C. M., Osses, M., & Aristizábal, B. H. (2018). Spatial and temporal disaggregation of the on-road vehicle emission inventory in a medium-sized Andean city. Comparison of GIS-based top-down methodologies. *Atmospheric Environment*, *179*, 142–155. https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2018.01.049

Lorenzo-Sáez, E., Oliver-Villanueva, J. V., Lemus-Zúñiga, L. G., Urchueguía, J. F., & Lerma-Arce, V. (2022). Development of sectorial and territorial information system to monitor GHG emissions as local and regional climate governance tool: Case study in Valencia (Spain). *Urban Climate*, *42*, 101125. https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2022.101125

Lugon, L., Kim, Y., Vigneron, J., Chrétien, O., André, M., André, J. M., Moukhtar, S., Redaelli, M., & Sartelet, K. (2022). Effect of vehicle fleet composition and mobility on outdoor population exposure: A street resolution analysis in Paris. *Atmospheric Pollution Research*, *13*(5), 101365. https://doi.org/10.1016/J.APR.2022.101365

MITECO. (2021). *Factores de Emisión. Registro de Huella de Carbono, Compensación y Proyectos de Absorción de Dióxido de Carbono*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

MITMA. (n.d.). *Mapas de tráfico*. Retrieved June 22, 2022, from https://www.mitma.es/carreteras/trafico-velocidades-y-accidentes-mapa-estimacion-y-evolucion/mapas-de-trafico

Monteiro, A., Sá, E., Fernandes, A., Gama, C., Sorte, S., Borrego, C., Lopes, M., & Russo, M. A. (2018). Correction to: How healthy will be the air quality in 2050? *Air Quality, Atmosphere & Health 2018 11:3*, *11*(3), 363–363. https://doi.org/10.1007/S11869-018-0569-1

Pisoni, E., Christidis, P., Thunis, P., & Trombetti, M. (2019). Evaluating the impact of “Sustainable Urban Mobility Plans” on urban background air quality. *Journal of Environmental Management*, *231*, 249–255. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2018.10.039

Ramacher, M. O. P., & Karl, M. (2020). Integrating Modes of Transport in a Dynamic Modelling Approach to Evaluate Population Exposure to Ambient NO2 and PM2.5 Pollution in Urban Areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health 2020, Vol. 17, Page 2099*, *17*(6), 2099. https://doi.org/10.3390/IJERPH17062099

Righini, G., Cappelletti, A., Ciucci, A., Cremona, G., Piersanti, A., Vitali, L., & Ciancarella, L. (2014). GIS based assessment of the spatial representativeness of air quality monitoring stations using pollutant emissions data. *Atmospheric Environment*, *97*, 121–129. https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2014.08.015

Rodrigues, V., Gama, C., Ascenso, A., Oliveira, K., Coelho, S., Monteiro, A., Hayes, E., & Lopes, M. (2021). Assessing air pollution in European cities to support a citizen centered approach to air quality management. *Science of The Total Environment*, *799*, 149311. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.149311

Tarriño-Ortiz, J., Gómez, J., Soria-Lara, J. A., & Vassallo, J. M. (2022). Analyzing the impact of Low Emission Zones on modal shift. *Sustainable Cities and Society*, *77*, 103562. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103562

Viana, M., de Leeuw, F., Bartonova, A., Castell, N., Ozturk, E., & González Ortiz, A. (2020). Air quality mitigation in European cities: Status and challenges ahead. *Environment International*, *143*, 105907. https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2020.105907



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 237-246

Cartografía de suelos expansivos mediante imágenes AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) en la Cuenca del Tajo (La Sagra, Toledo)

G. Frías [1], E. García-Meléndez [1], M. Ferrer-Julià [1], I. Pereira [1], E. Colmenero-Hidalgo [1], J.A. Cruz [1,2]

[1] Grupo de Investigación Geología Ambiental, Cuaternario y Geodiversidad (Q-GEO), Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León. Campus de Vegazana, s/n, 24071, León, España.
[2] Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. Avda. José Antonio Novais, s/n, 2840-Madrid (España)

gfriag00@estudiantes.unileon.es, egarm@unileon.es, mferj@unileon.es, iperer02@estudiantes.unileon.es, ecolh@unileon.es, jcruzmartinez@ucm.es

RESUMEN El presente trabajo tiene como finalidad la elaboración de una cartografía de susceptibilidad del terreno a la expansividad de los suelos en la comarca de La Sagra (Toledo, España). Esta zona de estudio se caracteriza por ser un referente en la explotación de rocas y minerales industriales, por predominar el uso agrícola de los terrenos, además de una elevada densidad de infraestructuras viarias que la cruzan, lo que hace incrementar la vulnerabilidad frente al fenómeno de la expansividad de los suelos. El método de análisis propuesto se basa en el uso de la Teledetección mediante la clasificación *SAM* (*Spectral Angle Mapper*) y *SID* (*Spectral Information Divergence*) de imágenes hiperespectrales adquiridas con el sensor *AHS (Airborne Hyperspectral Scanner)* para obtener una cartografía de la distribución de los minerales de la arcilla susceptibles de sufrir procesos de expansión y contracción. Asimismo, se ha empleado la fotointerpretación para la cartografía de formaciones superficiales, de manera que se pueda establecer una relación entre dichas formaciones y la distribución espacial de los minerales. Los resultados obtenidos muestran que el uso de espectros de referencia de la librería espectral del USGS (*United States Geological Survey*) a la hora de clasificar mejora la calidad de la cartografía mineralógica frente al uso de *Endmembers* formados por píxeles de la misma imagen, debido a la dificultad de encontrar píxeles puros. Igualmente, la combinación de los resultados de ambos procedimientos ha permitido generar una cartografía final de susceptibilidad en la que se puede identificar los elementos antrópicos tales como vías de comunicación o poblaciones que potencialmente pueden verse afectados por movimientos de expansión del suelo.

Palabras-clave: arcillas expansivas, imágenes hiperespectrales aeroportadas, formaciones superficiales, vulnerabilidad.

1. PROBLEMÁTICA INICIAL

La expansividad en suelos es un término habitualmente aplicado a cualquier suelo que tiene el potencial de hincharse o contraerse bajo condiciones de humedad, generalmente asociado a una alta concentración de minerales arcillosos. La problemática de los suelos expansivos ocurre ampliamente en todo el mundo, sin embargo, estos materiales son especialmente abundantes en regiones áridas y semi-áridas, donde la evapotranspiración supera la precipitación (Chen, 1975).

Los movimientos de los suelos expansivos provocan más daños a estructuras superficiales, tales como, edificios, pavimentos, muros de contención y revestimientos, que ningún otro riesgo natural, incluyendo terremotos e inundaciones (Jones y Holtz, 1973). Además de estos movimientos diferenciales de expansión y contracción sobre elementos superficiales, este tipo de suelos también pueden generar un efecto de presión horizontal sobre estructuras subterráneas, debido a que el incremento del contenido en agua de estos suelos adyacentes a cimentaciones subterráneas desemboca en un aumento de la presión lateral sobre estas estructuras, las cuales, si no poseen la suficiente fuerza de contención puede colapsar (Mir, 2013).

Para que el fenómeno de la expansividad tenga lugar deben darse dos requisitos: por un lado, las propiedades del suelo (factores intrínsecos), que establecen la capacidad expansiva teórica, y en segundo lugar como factores externos, el clima, la hidrología, la vegetación y la acción antrópica que determinan que se pueda desencadenar el proceso de expansividad (Caracedo *et al*., 1986). En concreto, en España, un 32% de las formaciones geológicas superficiales existentes contienen arcillas expansivas, y un 67% del territorio se

encuentra bajo climas en los que se pueden producir cambios de humedad significativos en el suelo. Este hecho, pone de relieve la importancia del conocimiento de estos lugares y, principalmente, de la cartografía y distribución espacial de los suelos potencialmente expansivos.

Una de las técnicas que ayudan a determinar esta distribución es la teledetección. La teledetección tiene como base conceptual la espectroscopía, basada en los principios físicos que gobiernan la interacción de la radiación electromagnética y la materia, de forma que la energía incidente es igual a la suma de la energía absorbida, transmitida y reflejada por cualquier objeto, en este caso un mineral. De esta forma, mediante la medición de dicha interacción se obtiene la información espectral de cualquier material, la cual puede llegar a abarcar varias regiones del espectro electromagnético, además de cualquier dominio espacial y cualquier estado de los materiales (Ben-Dor *et al*., 2013).

Entre los distintos sensores disponibles, los hiperespectrales se caracterizan por adquirir datos de imágenes en varias decenas de bandas espectrales continuas y estrechas en diversas regiones del espectro, lo que permite extraer las firmas espectrales características de los materiales, siendo estas únicas para la mayoría de los materiales naturales (Pu, 2017). Así pues, el objetivo del presente trabajo es la generación de una cartografía de minerales de arcillas expansivas en la comarca de La Sagra (Toledo). Para ello se analizarán imágenes hiperespectrales obtenidas con un sensor aeroportado y posteriormente el resultado se relacionará con las distintas formaciones superficiales.

2. ENCUADRE GENERAL

El área de estudio de la investigación se localiza en la comarca de La Sagra, en la provincia de Toledo, cercana al límite sur de la Comunidad de Madrid, comprendida entre el río Guadarrama y el Tajo. La zona de estudio tiene una extensión de 42 km^2 (Figura 1). Se encuentra atravesada por varias infraestructuras, entre las que destacan los tramos de las autovías A-42 (Autovía de Toledo) y AP-41 (Autopista Madrid-Toledo), junto a tramos de carreteras nacionales y autonómicas como la CM-4010 y TO-2437, así como la línea ferroviaria de alta velocidad Madrid- Toledo.

Esta comarca destaca por su gran importancia en referencia a la explotación de rocas y minerales industriales, tales como arcillas, gravas y arenas, yesos y depósitos de glauberita y thenardita. De estas explotaciones, sobresale la arcilla común como recurso mineral más relevante a nivel económico que abastece a un sector cerámico de fuerte implantación regional, además de arcillas magnésicas como la estevensita, utilizadas en distintos usos industriales.

Con respecto a la climatología, en primer lugar, las precipitaciones en la zona presentan una media anual de 414 mm concentradas en pocos meses al año. Esto, en combinación con las temperaturas que oscilan desde los 5 a 10 º C en los meses de invierno hasta los 30 º C de media en los meses estivales, favorecen los cambios de humedad en los suelos. Este escenario, como ya se ha comentado anteriormente, facilita el desarrollo de las arcillas expansivas.

En cuanto a su litología, los materiales aflorantes más representativos corresponden al Mioceno, los cuales presentan un marcado carácter detrítico en la parte septentrional. Dichos sedimentos son divididos en tres unidades litoestratigráficas de abajo a arriba (Ordoñez *et al.,* 1991, Cuevas *et al*., 2010):

- Unidad Inferior. Integrada por facies detríticas a los márgenes de la cuenca correspondientes a sistemas de abanicos aluviales, además de facies correspondientes a ambientes lacustres cerrados hacia el centro de la cuenca. Los sedimentos de la parte central de la cuenca corresponden mayormente a evaporitas cuya asociación mineral incluyen sulfatos y carbonatos (Ordoñez *et al.,* 1991, Cuevas *et al*., 2010).
- Unidad Intermedia. Esta unidad posee una disposición muy similar a la Unidad Inferior, la litología predominante son arcosas arenosas, que gradualmente dan paso a paleosuelos carbonatados y arcillas en las facies distales del abanico aluvial y en sistemas lacustres (Bustillo y Alonso-Zarza, 2007; Cuevas *et al*., 2010)
- Unidad Superior. Esta unidad se deposita de forma discordante sobre la Unidad Intermedia y muestra un patrón de distribución de facies diferente a las anteriores. Su base está compuesta por sedimentos detríticos (arcosas y litoarenitas) depositados en un sistema fluvial y a techo comienzan a predominar rocas carbonatadas (Wright *et al*., 1997; Cuevas *et al*., 2010).

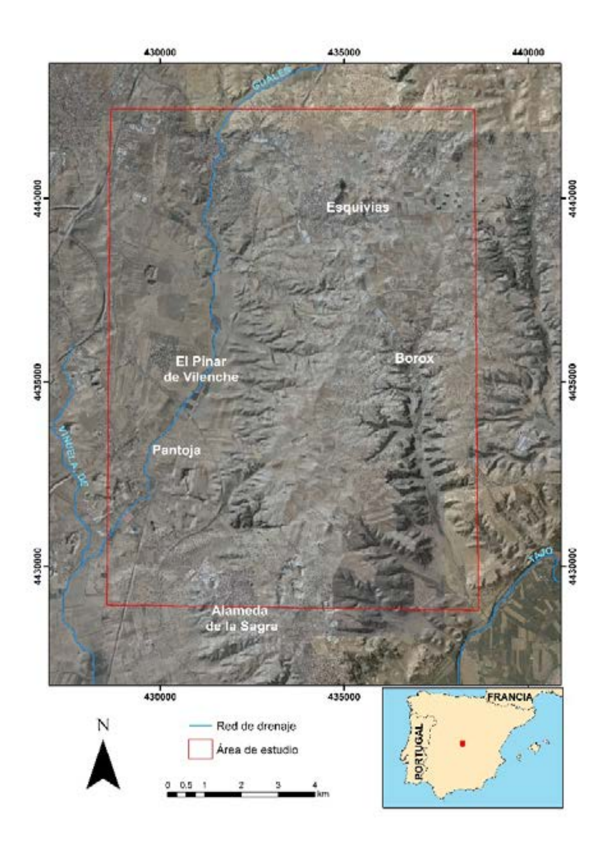


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio

3. MÉTODO

Para la obtención de los resultados de la investigación se llevó a cabo un procedimiento metodológico compuesto por tres fases. Una primera de fotointerpretación geológica y geomorfológica, una segunda de tratamiento digital de imágenes y una tercera en la que se analizó la susceptibilidad por suelos expansivos de las distintas formaciones superficiales mediante operaciones espaciales con un Sistema de Información Geográfica (SIG).

3.1. Fotointerpretación geológica y geomorfológica de fotografías aéreas

Para llevar a cabo la primera fase se interpretaron, mediante visión estereoscópica, 13 fotografías áreas pertenecientes al vuelo americano de 1957 (escala aproximada 1/33.000) del Instituto Geográfico del Ejercito como base para (i) la cartografía de los depósitos y formas de relieve correspondientes al Cuaternario y (ii) la caracterización de las unidades morfosedimentarias cartografiadas. Por medio de este análisis se realizó una clasificación del terreno con Unidades de Relieve, según el método de Cartografía Geomorfológica Aplicada (García-Meléndez, 2000). El objetivo de aplicar este método fue establecer una diferenciación de unidades según su relieve, litología, procesos geomorfológicos activos y el origen o génesis de las formas de relieve. El resultado de esta cartografía se digitalizó como entrada de datos en un SIG.

3.2. Tratamiento Digital de Imágenes

La segunda fase del método se centró en el análisis de imágenes hiperespectrales obtenidas mediante el sensor *AHS* aerotransportado (*Airborne Hyperespectral Scanner*), con el fin de realizar una cartografía de los minerales de arcilla potencialmente de tipo expansivo presentes en la zona de estudio. El sensor *AHS* tiene 80 canales de los cuales 63 canales cubren la parte reflectante del espectro (*VNIR - SWIR*), 7 canales en la región de 3177-5251 nm (infrarrojo medio, *MIR*) y 10 canales en el rango 8310-12952 nm (infrarrojo térmico *TIR*). La campaña de vuelo para la adquisición de imágenes sobre el área de estudio, fue llevada a cabo por el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial) usando el sensor *AHS*. Los datos son recogidos a las 11:30 UTC el 12 de septiembre de 2018 a 9000 pies (2743 m). Los datos de radiación del sensor fueron corregidos por el INTA, usando la Corrección Atmosférica y Topográfica (ATCOR -4 IFC) para obtener los va-

lores de reflectancia, y los datos georreferenciados con el sistema de coordenadas *Universal Transverse Mercator* (*UTM*), datum, *World Geodetic System* 1984 (*WGS*-84), zona 30 norte, con una resolución espacial de 6 m.

A partir de las imágenes obtenidas, se estima la respuesta espectral de los distintos materiales superficiales. Para ello, se toma como base los minerales representados en las curvas extraídas y analizadas a partir de los píxeles de la imagen, y los minerales descritos en la bibliografía consultada (Ordoñez *et* al., 1991; García Romero, 2004; Cuevas *et al*., 2010). Finalmente, los materiales que se pretendieron identificar en el área de estudio fueron: calcita, yeso, dolomita, montmorillonita, sepiolita, saponita, estevensita y paligorskita.

Para la obtención de la cartografía de distribución de dichos minerales, se realizaron dos clasificaciones supervisadas utilizando dos algoritmos: *SAM* (*Spectral Angle Mapper*) y *SID* (*Spectral Information Divergence*). En ambos casos, en primer lugar, es necesario localizar los *endmembers* (EMs), los cuales se definen como la curva espectral de una sustancia pura (o miembro puro) en este caso un mineral. En el presente estudio se utilizaron EMs derivados de la librería espectral del *USGS (United States Geological Survey)* (Kokaly *et al*., 2017) y de espectros obtenidos a partir de la propia imagen hiperespectral. Cabe destacar que, 3 de las curvas espectrales de la librería espectral utilizada, fueron obtenidas mediante mediciones en el terreno de la zona de estudio, las cuales corresponden a paligroskita, sepiolita y estevensita y fueron incorporadas a la librería espectral de este trabajo junto con las de otros los minerales de interés, extraídas de la librería espectral del *USGS*. Para ello se utilizó un espectroradiómetro "*FieldSpec* 4 *ASD*". El uso de estas curvas ha mostrado mejores resultados que EMs extraídos de la propia imagen (García-Meléndez *et al*., 2022).

3.3. Análisis espacial con SIG

Por último, en la tercera fase, se realizó la estimación de la susceptibilidad del terreno por suelos expansivos. La susceptibilidad se define como la mayor o menor predisposición a que un fenómeno suceda sobre un determinado espacio geográfico. En el presente estudio, la susceptibilidad está relacionada con la predisposición que presenta el terreno a la ocurrencia de suelos expansivos. Para esto, es necesario definir unas variables que determinen la capacidad que tiene el terreno de experimentar dichos movimientos de expansión o contracción. Como se describe en la problemática inicial, la capacidad de expansión de un suelo viene condicionado por la litología del terreno y su contenido en minerales de arcilla con potencial expansivo, y por la humedad del suelo, condicionada por la climatología. En primer lugar, para cuantificar el potencial de expansividad de los minerales de la arcilla, se otorgaron valores cuantitativos en función del potencial expansivo de cada mineral identificado y, por otra parte también se otorgaron valores cuantitativos a las formaciones superficiales atendiendo a sus características geotécnicas, tomando como referencia los estudios geológicos realizados en la zona a cargo del Instituto Geológico y Minero de España (1972 y 1976) y la pendiente que estas formaciones poseen. Los valores cuantitativos establecidos para las unidades de relieve fueron: alto (3) para la Unidad de Relieve III, medio (2) para la Unidad de Relieve IV, bajo (1) para Unidad de Relieve II y nulo (0) para la Unidad de Relieve I.

En segundo lugar, para calcular la predisposición del terreno a acumular humedad en el suelo, se empleó el cálculo del Índice de Humedad Topográfica (TWI, *Topographic Wetness Index*) (Kopecký *et al*., 2021). Este índice relaciona el factor topográfico de la zona de estudio con el clima, en este caso la humedad como factor desencadenante en la expansividad de los suelos. Para calcular el TWI se emplea la siguiente expresión matemática:

$$TWI = ln \frac{a}{\tan b}$$

Donde a es el aporte de la red de drenaje aguas arriba y b la pendiente expresada en radianes. Para ello se partió del Modelo de Elevación Digital con una resolución espacial de 5x5 metros, obtenido desde el centro de descargas del CNIG (IGN), del cual se obtuvo (i) el mapa de pendientes en radianes y (ii) el mapa de celdas acumuladas en toda la red de drenaje. Finalmente, se aplicó la expresión matemática, mediante la cual se obtuvo el TWI para la zona de estudio.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cartografía de formaciones superficiales

Mediante el proceso de fotointerpretación se ha generado la cartografía de Unidades de Relieve y de Formaciones Superficiales. En esta última se agrupan los depósitos más modernos que se encuentran en la superficie del área de estudio y no forman roca consolidada (Figura 2). Las agrupaciones se han realizado

atendiendo a criterios de génesis o asociación a los distintos modelados presentes y a su composición litológica (IGME, 1972; IGME, 1976). Estas formaciones están integradas por depósitos cuaternarios y suelos edáficos que se desarrollan sobre las formaciones geológicas, clasificándose según su génesis:

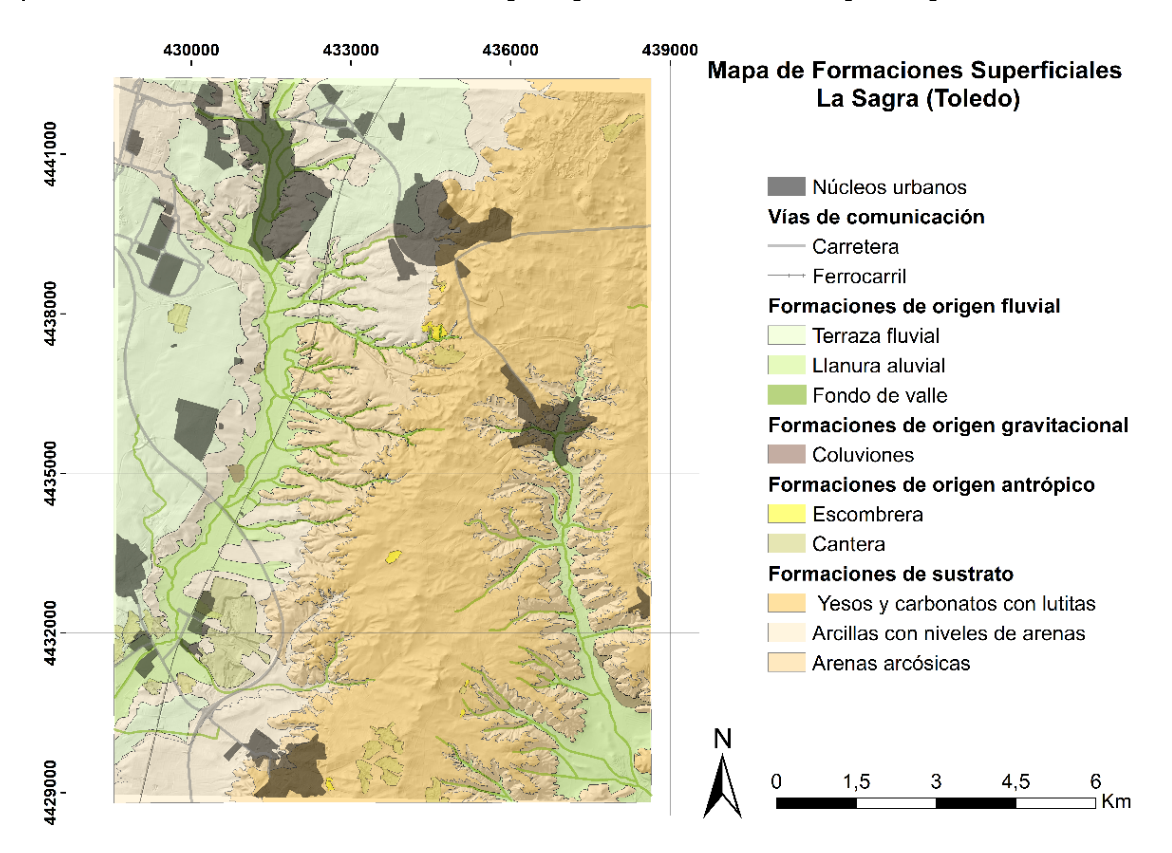


Figura 2. Mapa de Formaciones Superficiales correspondiente al área de estudio de La Sagra (Toledo).

- Formaciones superficiales de origen fluvial. Se agrupan en esta tipología las terrazas fluviales, llanuras aluviales y rellenos de fondo de valle, asociados a la dinámica fluvial que ha tenido lugar en la zona. En primer lugar, se definen tres depósitos de terraza asociados al curso del arroyo Guatén, compuestos por una litología de arenas contenidas en una matriz arcillosa. En referencia a las llanuras aluviales de ambos arroyos, estas están constituidas por arenas arcillosas y arcillas limosas. Por último, los depósitos asociados a los fondos de valle están relacionados con la actual actividad de la red de drenaje presente en la zona, y se encuentran compuestos por gravas y arenas con recubrimientos de arcillas y limos.
- Formaciones superficiales originadas por acción de la gravedad. En estas formaciones se incluyen depósitos cuya génesis se debe a la acción de la gravedad, asociados a los bordes de los taludes que limitan con las llanuras aluviales de los arroyos Guatén y Borox. Su litología varía en función de su localización, siendo los depósitos limoso-arenosos los emplazados en los bordes del arroyo Guatén y arenoso-arcósicos los localizados en los bordes del arroyo de Borox.
- Formaciones superficiales de origen antrópico. Se agrupan en ellas principalmente los depósitos asociados a las actividades mineras presentes en la zona de estudio. Es posible distinguir (i) depósitos con relieve positivo, identificado con escombreras, y (ii) de relieves hundidos, identificado con explotaciones a cielo abierto. Los depósitos están compuestos principalmente por materiales más arcillosos, y en la parte más meridional son yesífero-arcillosos.
- Formaciones superficiales en sustrato. Son formaciones que se desarrollan sobre el sustrato rocoso/sedimentario procedentes de su alteración o disgregación sin que se realice transporte de los materiales, desarrollando suelos de poco espesor (materiales eluviales). En primer lugar, se identifican depósitos de arenas arcósicas, próximos a la localidad de Esquivias y Alameda de la Sagra, ocupando zonas donde se encaja la red fluvial. También se identifican depósitos de arcillas con niveles de arenas con pendientes suaves y depositadas estratigráficamente debajo de las terrazas fluviales, presentando una litología

similar debido a la disgregación de los sedimentos localizados pendiente arriba. Y finalmente, se localizan los depósitos de yesos y carbonatos con lutitas, cuya formación es la más extensa.

4.2. Cartografía mineral

A partir de la clasificación de las imágenes se obtuvo una cartografía que muestra a la montmorillonita y la paligorskita como los minerales con mayor presencia en el área de estudio y, como minerales con una presencia más residual, los carbonatos con una distribución más dispersa (Figura 3). Estos resultados mantienen el número de *EMs* empleados en la clasificación y que se describen en Ordoñez *et* al., 1991, García Romero, 2004 y Cuevas *et al*., 2010. Su distribución general también se ajusta a la bibliografía consultada, de forma que se ha podido validar inicialmente los resultados de la cartografía mineral mediante su comparación con las descripciones de la presencia de los minerales detectados en la cartografía geológica y en las memorias explicativas del MAGNA (Martín Serrano *et al*., 2001).

4.3. Relación entre la mineralogía y las formaciones superficiales

Según los resultados obtenidos mediante la cartografía de distribución de los minerales, es posible establecer relaciones entre dichos minerales presentes en el área de estudio con las formaciones superficiales. Para ello, a continuación, se estudia individualmente cada formación superficial con la distribución mineralógica presente en cada una de ellas agrupándolas en función de la génesis común de sus materiales:

- Formaciones superficiales de origen fluvial. En las tres formaciones de origen fluvial es posible apreciar que el mineral que abarca gran parte de la superficie es la montmorillonita (Tabla 1). Sin embargo, es posible observar diferencias en la distribución de los minerales atendiendo a la litología que constituye cada formación superficial. Es importante remarcar cómo en la formación superficial de las terrazas fluviales existe una gran abundancia de la paligorskita. Esto es debido a la posición que ocupa alguna de sus terrazas, que mediante el transporte de la red fluvial recibe el aporte de los minerales localizados pendiente arriba. También cabe destacar el porcentaje que ocupa en la superficie el EM de vegetación vigorosa en la formación de los fondos de valle, lo cual es comprensible dado que en esta formación discurren los cursos de agua activos y donde el suelo tiene mayor contenido en humedad.

- Formaciones superficiales originadas por gravedad. Para el caso de las formaciones superficiales originadas por gravedad su distribución mineralógica se encuentra estrechamente relacionada con la litología de la fuente de aporte de sedimentos (Tabla 1). En este caso, el mineral que presenta una mayor distribución es la montmorillonita depositada a partir de la erosión realizada por el encajamiento de la red fluvial y su posterior transporte por acción de la gravedad. Por la mayor presencia del EMs de la vegetación seca, se puede asumir que los procesos gravitacionales se encuentran inactivos y parcialmente colonizados por la vegetación.

- Formaciones superficiales de origen antrópico. Para estas formaciones de origen antrópico, la interpretación de la distribución resultará relevante puesto que en función de los EMs presentes con mayor representación se puede relacionar el tipo de mineral o roca que se extraían en las explotaciones de la zona (Tabla 1). En el caso de las escombreras, el mineral que muestra una mayor distribución es la paligorskita junto a la sepiolita, vinculados a explotaciones de materiales arcillosos. Los datos de distribución asociados a las canteras también nos indican que las explotaciones se centran en las arcillas puesto que las mayores distribuciones de minerales en las canteras son de montmorillonita y saponita.

- Formaciones superficiales en sustrato (Formaciones eluviales). En las tres formaciones eluviales descritas, la distribución mineral en cada formación estará estrechamente ligada con la naturaleza litológica de la misma (Tabla 1). En el caso de las *Formación de arcillas con niveles de arenas*, se observa que predominan la paligorskita y montmorillonita alcanzando porcentajes superiores al 50%, lo que confirma la naturaleza arcillosa de esta formación, siendo identificada como la unidad cuaternaria formada por terrazas y glacis con un alto contenido en materiales arcillosos. Para el caso de la *Formación de arenas arcósicas* se observa una distribución más equitativa entre los minerales arcillosos sin que predomine uno por encima de otro, estando estrechamente relacionada con la Unidad Inferior del Mioceno que posee una litología más detrítica. Por último, en la *Formación de yesos y carbonatos con lutitas* se puede apreciar un ligero aumento en la distribución de los yesos y el predominio de la paligorskita como mineral mayoritario en la distribución remarcando el carácter lutítico de esta formación, identificándose con la Unidad Intermedia del Mioceno formada por un alto contenido en arcillas ricas en magnesio (Mg) como la sepiolita.

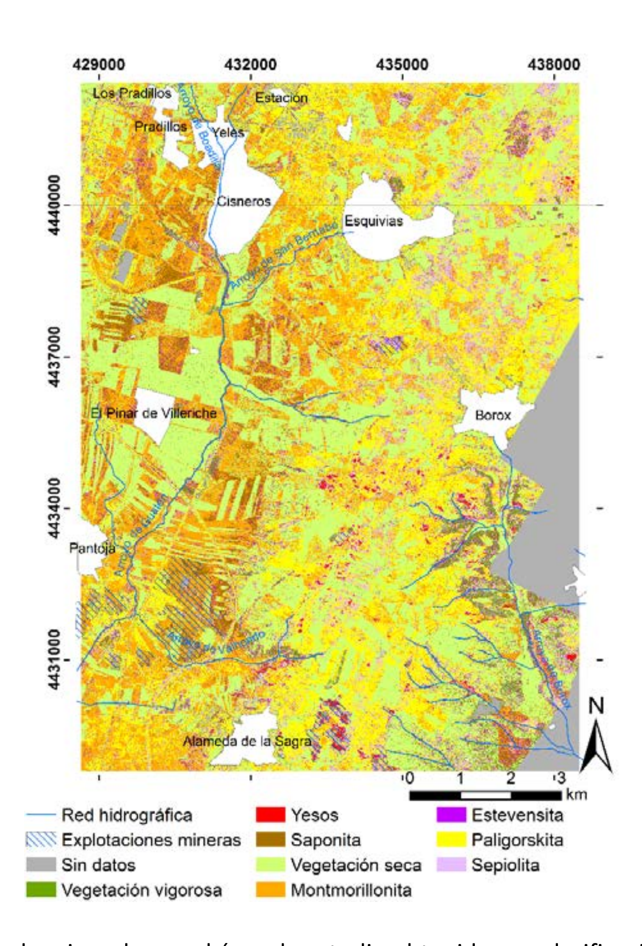


Figura 3. Distribución de minerales en el área de estudio obtenido con clasificación SAM mediante *endmembers* de referencia.

Tabla 1. Distribución espacial en porcentaje de los *endmembers* definidos en cada una de las formaciones superficiales descritas

Origen	*Fluvial*			*Gravedad*	*Antrópico*		*Eluvial*		
Endmember	*Terrazas*	*Llanuras aluviales*	*Fondos de valle*	*Coluviones*	*Escombreras*	*Canteras*	*Arcillas con niveles de arenas*	*Arenas arcósicas*	*Yesos y carbonatos con lutitas*
Sin clasificar	4,49	10,62	9,48	3,93	0,84	3,44	3,27	11,69	8,63
Veg. vigorosa	2,01	4,80	12,55	2,48	4,75	2,65	2,07	7,65	1,38
Yesos	0,06	0,24	0,19	0,19	2,41	2,38	0,11	0,36	0,70
Saponita	7,36	7,59	8,40	4,56	5,52	12,67	6,32	6,97	1,79
Veg. seca	33,12	31,39	29,06	66,91	16,95	11,80	26,61	29,93	29,63
Montmorill.	24,99	21,84	11,92	9,80	3,21	35,47	31,73	13,89	9,66
Estevensita	2,79	4,52	7,56	1,97	5,31	4,67	3,05	4,42	1,81
Paligorskita	20,82	12,86	12,33	3,67	31,83	13,74	21,33	14,95	33,53
Sepiolita	4,35	6,14	8,51	6,49	29,18	13,17	5,51	10,13	12,87

4.4. Análisis de la susceptibilidad del terreno a suelos expansivos

Como se ha mencionado anteriormente, los elementos determinantes a la expansividad de los suelos son la distribución espacial de los minerales con potencial expansivo, las formaciones superficiales descritas

y el índice de humedad topográfico.

En primer lugar, la distribución de los minerales con potencial expansivo representa el elemento más determinante en los problemas que ocasionan los suelos expansivos. Esto es debido a la presencia de minerales con alta capacidad expansiva como la montmorillonita, la saponita y la estevensita, los cuales determinarán en mayor o menor grado la capacidad expansiva del sustrato. Por otra parte, las formaciones superficiales y unidades de relieve también representan un elemento a tener en cuenta al determinar la susceptibilidad, puesto que la litología de dichas formaciones influye en las características del terreno, con lo cual se les ha otorgado un valor categórico en función de su litología y sus características geotécnicas (IGME, 1972).

Por último, el índice de humedad asociado a la topografía es de gran utilidad al indicar las zonas más propensas a acumular humedad en el suelo. En el área de estudio, estas zonas se sitúan en los fondos de valle y llanuras aluviales de los arroyos de Borox y Guatén, y en las zonas correspondientes a la extensión de la formación del sustrato de yesos y carbonatos con lutitas. En menor medida este índice refleja también acumulaciones al pie de los taludes, al borde de las llanuras aluviales y asociadas a las zonas con pequeños relieves alomados. Estos valores son de gran importancia, al tratarse del factor desencadenante de la expansividad de los suelos. Finalmente, mediante la combinación de estos parámetros, se obtiene el mapa de susceptibilidad a suelos expansivos categorizado en cuatro clases (Figura 4).

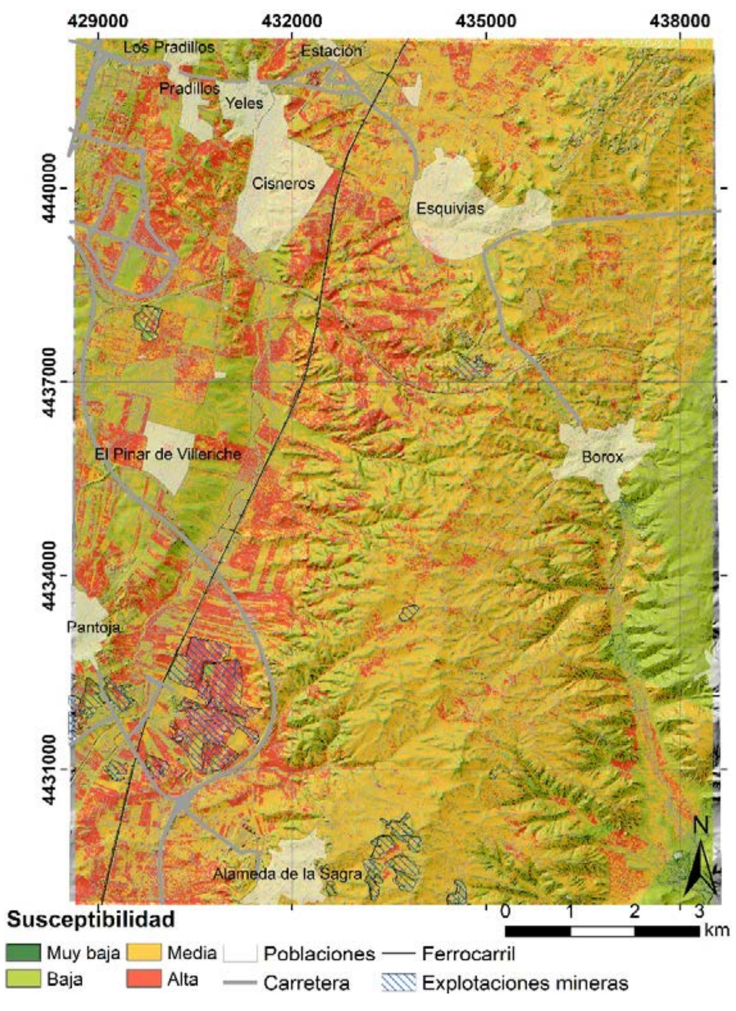


Figura 4. Mapa de susceptibilidad del terreno a suelos expansivos en la zona de estudio de la Sagra (Toledo).

En el mapa de susceptibilidad, se observan las áreas más susceptibles a experimentar expansividad (rojo), que corresponden a las zonas donde las concentraciones de montmorillonita son elevadas, coincidiendo además con los relieves llanos que permiten la acumulación de humedad. Estas áreas de alta susceptibilidad se encuentran localizadas en el sector central y oriental de la zona de estudio, y, en menor medida, en las proximidades de las localidades de Alameda de la Sagra, Pantoja, Cisneros, Yeles y Esquivias. Además,

varias de las líneas de comunicaciones representadas atraviesan zonas de alta susceptibilidad, como el trazado ferroviario que podría presentar problemas en su estructura si tuviera lugar la expansividad del suelo.

Las zonas con susceptibilidad media (amarillo) ocupan la zona central y nororiental del área de estudio, debido a la morfología llana del relieve en combinación a una mayor presencia de otros minerales con un potencial expansivo menor a la montmorillonita. El área de susceptibilidad media se identifica con una litología yesífero-lutítica, y su morfología más llana con relieves residuales. Este área afecta a casi la totalidad del estudio, debido a la naturaleza arcillosa de los materiales presentes, pudiendo llegar a afectar a la totalidad de las vías de comunicación además de localidades como Borox, Esquivias y Alameda de la Sagra.

Por último, las zonas con susceptibilidad muy baja (verde oscuro) y baja (verde claro), se asocian a los cauces activos de los arroyos Guatén y Borox, junto a las zonas de alta pendiente donde se produce el encajamiento de la red fluvial. Este área de baja y muy baja susceptibilidad presenta pendientes elevadas donde no se produce acumulación de humedad, debido a que el agua fluye por escorrentía superficial a las zonas más bajas.

5. CONCLUSIONES

El procedimiento llevado a cabo es un primer paso para el cálculo de la susceptibilidad del terreno por suelos expansivos, resultando muy efectivo para realizar una primera aproximación sobre los posibles problemas que puede presentar una zona en concreto. Las imágenes hiperespectrales de gran resolución espacial empleadas han mostrado su idoneidad para determinar con gran precisión espacial la distribución de los minerales que pueden presentar problemas de expansividad sobre las infraestructuras.

El uso de la fotointerpretación para la cartografía y definición de unidades de relieve y formaciones superficiales es un gran aporte para el análisis de la cartografía final obtenida, ya que permite establecer relaciones entre la litología y el relieve presente en la zona de estudio y la distribución mineral. Asimismo, el índice de humedad asociado a la topografía es de gran utilidad al indicar las zonas más propensas a acumular humedad en el suelo. Este valor es de gran importancia al tratarse del factor desencadenante de la expansividad de los suelos.

El empleo de imágenes hiperespectrales para el desarrollo de este estudio supone una enorme ventaja frente al uso de imágenes multiespectrales, debido a que las primeras aportan más información referente a la reflectancia de los materiales superficiales del área de estudio. Por esta propiedad de las imágenes hiperespectrales, resulta de gran utilidad la identificación de los minerales presentes en la superficie del área de estudio, además ha sido posible confirmar la presencia de estos minerales gracias a la consulta de estudios geológicos realizados en la zona. Por otra parte, las limitaciones en el uso de estas imágenes es su accesibilidad, puesto que, al obtenerse mediante sensores aeroportados, es necesario realizar una campaña para la obtención de las mismas, mientras que, en el caso de las imágenes multiespectrales son obtenidas mediante sensores satelitales, por lo que tienen una mayor accesibilidad para su uso.

En definitiva, el uso de las Tecnologías de Información Geográfica (TIG) empleadas para la cartografía mineralógica y de formas del relieve supone una herramienta idónea en el campo de las Ciencias Geológicas, ya que, con los datos adecuados, permite realizar cartografías de gran detalle para el estudio y caracterización de riesgos geológicos, además de suponer una mejora de los mapas geológicos convencionales al proporcionar un mayor detalle composicional.

AGRADECIMIENTOS

Investigación financiada por FEDER/ Ministerio de Ciencia e Innovación –Agencia Estatal de Investigación/Proyecto ISGEOMIN-ESP2017-89045-R y por el proyecto HYPOPROCKS-PDC2021-121352-100 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea "NextGenerationEU"/PRTR.

6. BIBLIOGRAFÍA

Ben-Dor, E., Schläpfer, D., Plaza, A.J. and Malthus, T. (2013). Hyperspectral Remote Sensing. In Airborne Measurements for Environmental Research (eds A. Kokhanovsky, M. Wendisch and J.-L. Brenguier). Doi:10.1002/9783527653218. 413-456 pp.

Bustillo, M. A., y Alonso-Zarza, A. M. (2007). Overlapping of pedogenesis and meteoric diagenesis in distal alluvial and shallow lacustrine deposits in the Madrid Miocene Basin, Spain. *Sedimentary Geology*, 198, 255–271.

F.H. Chen. (1975). Foundations of expansive soils. 280p, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

Cuevas, J., Fernández Barrenechea, J. M., García Romero, E., Leguey Galán, S., y Luque del Villar, F. J. (2010). Field trip guide and abstracts of the sepiolite Symposium: June 7th, 2010, Madrid- Seville, Spain/2010 SEA-CSSJ-CMS Trilateral Meeting on Clays.

Cuevas, J., Pelayo, M., Rivas, P. y Leguey, S. (1993). Characterization of Mg-Clays from the Neogene of the Madrid Basin and their potential as backfilling and sealing material in high level radioactive waste disposal. *Applied Clay Science*, 7, 383-406.

Díaz de Neira, J.A., López Olmedo, F., Ortega, L.I., Solé Pont, J. y Calvo Sorando J.P. (2007). Mapa geológico de la Hoja no 604 (Villaluenga de la Sagra). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME. Depósito legal: M-21890-2007.

García Romero, E. (2004). Génesis de arcillas magnésicas en la cuenca de Madrid: interrogantes planteados. Boletín Geológico y Minero,115, 629-640.

García-Meléndez, E., Ferrer-Julià, M., Frías, G., Colmenero-Hidalgo, E., Espín de Gea, A., Reyes, M., Carreño, F. Cruz, J.a., Báscones, A. y Pereira, I. (2022). Earth observation from AHS (Airborne hyperspectral Scanner) data: spectral response of landforms. 10th IAG International Conference on Geomorphology, Coimbra (Portugal), 12-16 September.

García-Meléndez, E. (2000). “Geomorfología y Neotectónica del Cuaternario de la cuenca de Húercal-Overa y corredor del Almanzora. Análisis y Cartografía mediante Teledetección y SIG”. Unpublished PhD Thesis. Universidad de Salamanca, Salamanca: 528 pp.

Hunt, G. R., Salisbury, J. W. y Lenhoff, C. J. (1973). Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. VI. Additional silicates. *Modern Geology*, 4, 85-106.

IGME (1976). Mapa Geotécnico de Ordenación Territorial y Urbana de la Subregión de Madrid. Getafe. E. 1:100.000. Hoja 10–12. Madrid.

IGME (1972). Mapa Geotécnico General. Madrid. E. 1:20.000. Hoja 5-6/45. Madrid.

Jensen, J. R. (1986). “Introductory digital image processing: a remote sensing perspective”. Univ. of South Carolina, Columbus.

Jones Jr, D. E., & Holtz, W. G. (1973). Expansive soils-the hidden disaster.*Civil engineering*, New York.*43*(8).

Kokaly, R. F., Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Hoefen, T. M., Pearson, N. C. y Klein, A. J. (2017). “USGS spectral library version 7 data: US Geological Survey data release”. United States Geological Survey (USGS): Reston, VA, USA.

Kopecký, M., Macek, M., & Wild, J. (2021). Topographic Wetness Index calculation guidelines based on measured soil moisture and plant species composition. *Science of the Total Environment*, 757, 143785. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143785.

Martín Serrano, A., Rubio, F. y Silva P.G. (2001). Cartografía y Memoria del Cuaternario y Geomorfología, Hoja de Aranjuez (649). Mapa Geológico de España escala 1:50.000 2º Serie (MAGNA). IGME. Serv. Pub. Mº Industria. Madrid.

Mir B.A. y Sridharan A. (2013). Physical and Compaction Behavior of Clay Soil–Fly Ash Mixtures. *Geotech Geol Eng*., 31, 1059–72. Doi: 10.1007/s10706-013-9632-8.

Ordoñez, S., Calvo, J.P., García del Cura, M.A., Alonso-Zarza y Hoyos, M. (1991). Sedimentology of sodium sulfate and special clays from the Tertiary Madrid Basin (Spain). Spec. Publs. *Int. Ass. Sediments*,13, 39-55.

Pu, R. (2017). “Hyperspectral remote sensing: fundamentals and practices”. CRC Press, 491 pp.

Wright, V.E., Alonso-Zarza, A.M., Sanz, M.E. y Calvo, J.P. (1997). Diagenesis of Late Miocene micritic lacustrine carbonates, Madrid Basin, Spain. *Sedimentary Geology*, 114, 81-95.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 247-256

Cartografía de severidad de defoliación en el Prepirineo aragonés mediante imágenes Sentinel-2 y software libre

P. Gabas Alcaine[1], A. García-Martín[2,3]

[1] *Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50.009. Zaragoza.*
[2] *Centro Universitario de la Defensa de la Academia General Militar. Ctra. de Huesca s/n, 50.090 Zaragoza.*
[3] *Geoforest- Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50.009 Zaragoza.*

pablogalcaine@gmail.com, algarcia@unizar.es

RESUMEN: En la actualidad, la defoliación tiene un gran protagonismo en el decaimiento de las masas forestales, lo que es motivo de preocupación. Su evaluación y control resulta vital, dado que compromete la productividad y la pervivencia de los ecosistemas forestales, siendo la teledetección una herramienta ideal para su monitorización. El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología sin coste y transferible a la administración pública para estimar la severidad de la defoliación sobre las masas forestales. Para ello, se utiliza como zona experimental un área del Prepirineo aragonés, los datos de la Red de Evaluación Fitosanitaria de las Masas Forestales de Aragón (REFMFA) e imágenes Sentinel 2. Para el tratamiento de las imágenes, la obtención de índices de vegetación y la aplicación de procesos de clasificación digital conducentes a la obtención de cartografía de severidad de la defoliación y su validación, se emplea el software de la Agencia Espacial Europea (ESA) SNAP, mientras que como herramienta de Sistema de Información Geográfica (SIG) se emplea QGIS. En el proceso de clasificación, al objeto de caracterizar mejor el estado de los bosques y su evolución, se ensayan categorías de severidad más acotadas que las propuestas por la administración aragonesa. Los resultados obtenidos muestran que la metodología creada permite espacializar y analizar la severidad de la defoliación y su comportamiento espacio-temporal. El método de clasificación más robusto es el método no paramétrico *Random Forest*, obteniéndose un porcentaje de acierto con los mejores modelos de entre un 88-95% utilizando las categorías empleadas por la administración y entre un 92-98% con las propuestas en este trabajo.

Palabras-clave: defoliación forestal, Sentinel-2, software libre, Prepirineo aragonés.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, las masas forestales han experimentado un decaimiento en su estado sanitario a consecuencia de un aumento significativo del número de perturbaciones que las afectan fruto de una compleja interacción de factores. Tal pérdida de sanidad forestal es objeto de preocupación, tanto a nivel internacional como regional, para las políticas ambientales y de planificación forestal sostenible, lo que ha implicado un largo historial de medidas y acciones (Millar y Stephenson, 2015; Zarco-Tejada et al., 2018). Entre ellas está la Red de Evaluación Fitosanitaria de las Masas Forestales de Aragón (REFMFA), que establece una parcela de control y seguimiento por cada 5200 ha de superficie arbolada (Gobierno de Aragón, 2008).

Una de las perturbaciones que afectan al estado sanitario de las masas forestales y a la dinámica de los ecosistemas es la defoliación, siendo definida como la pérdida no fenológica o la falta de desarrollo de las hojas o acículas que sufre un árbol en la copa en comparación con un pie de referencia ideal sin daños (Gobierno de España, 2017; Gottardini et al., 2020). La defoliación provoca un incremento de la susceptibilidad de las masas a ser infectadas por un huésped secundario, elevándose su mortalidad tras ser atacadas en sucesivos eventos (Meng et al., 2018; Zarco-Tejada et al., 2018). Así, la defoliación es uno de los responsables tanto de pérdidas económicas en la explotación forestal a largo plazo, como de errores en las predicciones de secuestro de carbono (Gottardini et al., 2020; Meng et al., 2018). El futuro no es halagüeño, dado que numerosos estudios pronostican que el cambio climático y los procesos de globalización van a aumentar la severidad de la defoliación en diferentes ecosistemas forestales, poniéndose así en peligro la consecución de

los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) Acción por el Clima (13) y Vida de Ecosistemas Terrestres (15).

A este respecto, el tratamiento de imágenes de satélite ópticas se ha mostrado como una herramienta válida para el estudio de la defoliación ya que proporciona información de carácter completo y continuo de un territorio, superando las limitaciones que presentan los muestreos puntuales de los inventarios, si bien es ineludible el trabajo de campo (p.e.: Latifi et al., 2014; Sangüesa et al., 2014; Hawryło et al., 2018; Rengarajan y Schott, 2018; Zarco-Tejada et al., 2018; Bárta et al., 2021). En este contexto, este trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología sin coste y transferible a la administración pública para estimar la severidad de la defoliación sobre las masas forestales mediante el empleo de software libre, tanto de tratamiento de imágenes de satélite como de SIG. En concreto, para la primera cuestión se utiliza el software SNAP (*Sentinel Application Platform*) (https://earth.esa.int/eogateway/tools/snap), mientras que para la segunda se hace uso de QGIS (https://www.qgis.org/es/site/). Se pretende con ello facilitar una herramienta que permita a la administración pública contribuir a la consecución de metas en los dos ODS previamente mencionados.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio seleccionada se encuentra en el Prepirineo aragonés y fue delimitada siguiendo las indicaciones del personal del Servicio de Sanidad Forestal del Gobierno de Aragón, quienes la señalaron como una zona de control fitopatológico prioritaria a tenor de lo observado en la comunidad autónoma (Figura 1). Esta zona incluye tanto la depresión media como parte de las sierras interiores y exteriores pirenaicas. Su gradiente altitudinal posibilita la presencia de varias especies de los géneros *Pinus* y *Quercus*. En esta zona existen varios Espacios Naturales Protegidos (ENP) suponiendo estos un total del 62 % de la superficie arbolada del área de estudio.

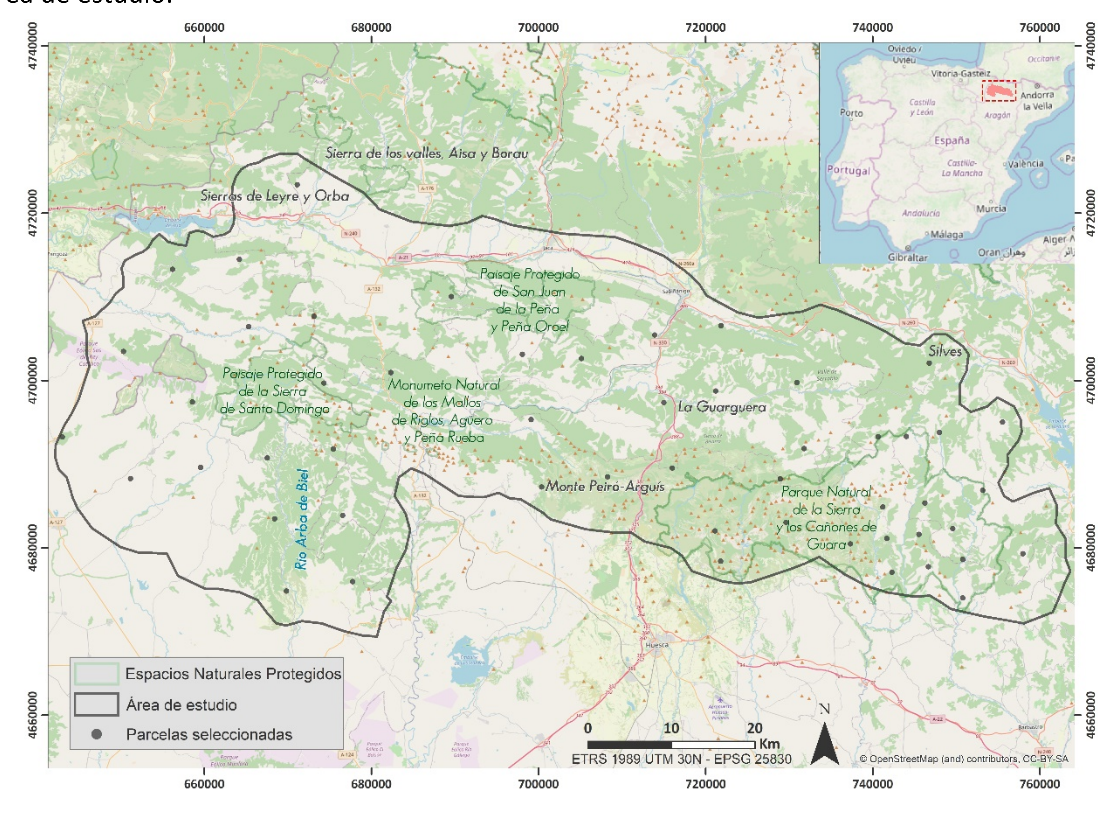


Figura 1. Área de estudio y parcelas REFMFA incluidas en ella. Fuente: REFMFA y OpenStreetMap. Elaboración propia.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Información sobre la defoliación en el área de estudio: la Red de Evaluación Fitosanitaria de Aragón

La REFMFA surgió ante la necesidad del Gobierno de Aragón de crear programas de monitorización complementarios a los elaborados por el ICP-Forest y la Unión Europea, ofreciendo balances periódicos del estado de los bosques. La REFMFA se desglosa en componentes, indicadores e informe anual, destacando, entre los fundamentales, las Redes de Nivel I y II de la U.E. sobre Daños Forestales (Gobierno de Aragón,

2008):

- *Red de Rango I*. Compuesta por una malla de parcelas que coinciden con las intersecciones de una malla de 8x8 km. Esta red ocupa el total de la superficie forestal de la comunidad autónoma.
- *Red de Rango II*. Compuesta por una malla de parcelas que coinciden con las intersecciones de una malla de 4x4 km. Esta segunda red aparece sólo en los Espacios Naturales Protegidos.

Ambos tipos de redes están presentes en la zona de estudio, sumando un total de 52 parcelas (Figura 1). De estas, el 59,25% tiene como especie dominante una del género *Pinus* (17 parcelas a *Pinus sylvestris*, 11 a *Pinus nigra* y 4 a *Pinus halepensis*) y el restante 40,75% una del género *Quercus* (12 parcelas a *Quercus ilex* y 8 a *Quercus faginea*). Las parcelas están determinadas por cuatro cuadrantes con respecto al centro de la misma siguiendo los ejes Norte-Sur y Este-Oeste, seleccionándose en cada cuadrante los 6 pies del estrato dominante más próximos al centro (con unas dimensiones mínimas de 60 cm de altura y 7,5 cm de diámetro en la base), con lo que el total de pies inventariados es de 24. Sobre estos pies se toman se toman medidas dasométricas y se evalúa su estado sanitario (defoliación, decoloración, daños por distintos agentes, etc.) de forma anual. En concreto, el parámetro de defoliación utilizado en este trabajo mide, en porcentaje, la cantidad de hoja perdida por el árbol respecto a su situación óptima en comparación con el árbol de referencia. La defoliación es considerada como el principal indicador del estado de salud de la masa en la REFMFA.

3.2. Selección de las imágenes ópticas y aplicación de pretratamientos

Teniendo en cuenta la escala de trabajo y que el objetivo es crear una metodología útil para la administración pública sin coste alguno, las imágenes ópticas que se consideraron más apropiadas fueron las procedentes de los sensores OLI y MSI a bordo de los satélites Landsat-8 y Sentinel-2, respectivamente. Se escogieron las de Sentinel-2 en base a su mejor resolución espacial, espectral y temporal. Esta selección condicionó el periodo temporal del trabajo, dado que sólo existían escenas del área de estudio desde 2015. El segundo condicionante del periodo temporal fue la disponibilidad de los datos de defoliación proporcionados por el Gobierno de Aragón en el momento de realizarse este trabajo, que llegaba hasta el año 2017. Así, la selección y descarga de imágenes se restringió al periodo 2015-2017, escogiendo las más adecuadas en consideración a: (i) la inexistencia de nubes y sombras sobre las 52 parcelas seleccionadas; y (ii) su adquisición dentro de las fechas de toma de los datos de campo o en la fecha más cercana posible para garantizar la representatividad de las condiciones de terreno por parte de las imágenes seleccionadas (Tabla 1).

Las imágenes fueron descargadas como productos L1C, es decir, estando la reflectividad calculada en el techo de la atmósfera (*Top Of Atmosphere reflectance*, TOA). Para obtener la reflectividad superficial (*Bottom Of Atmosphere reflectance*, BOA) libre de los efectos de la atmósfera, de la geometría de la iluminación-observación y de la *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF), se aplicó el modelo físico de transferencia radiativa Sen2Cor incluido en SNAP (Müller-Wilm, 2017). En el proceso se decidió que todas las bandas reflectivas que se iban a utilizar en los procesos de clasificación (B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8A, B11 y B12) fueran obtenidas con una resolución espacial de 10 m, conservándose de esta forma el máximo de resolución espacial que ofrecen las imágenes Sentinel-2 en las bandas del visible (B2, B3, B4) y del infrarrojo cercano (B8). Finalmente, se calcularon índices de vegetación al objeto de mejorar la discriminación de las masas vegetales y su estado sanitario. Teniendo en cuenta las imágenes utilizadas en este trabajo y su temática, se seleccionaron los índices de vegetación que alcanzaron los mejores resultados en el trabajo de Hawryło et al. (2018): ARI 1 (Gitelson et al., 2001), CRI 1 (Gitelson et al., 2002), GNDVI (Gitelson et al., 1996), MCARI (Daughtry, 2000), MTCI (Dash y Curran, 2007), NBR (Key et al., 2002), NDI45 (Frampton et al., 2013), NDVI (Rouse et al., 1974), NDWI (Gao, 1996), PSSR (Blackburn, 1998) y SAVI (Huete, 1988).

Tabla 1. Fechas de muestreo de campo y de adquisición de imágenes. Fuentes: Gobierno de Aragón y ESA.

Fecha de muestreo de datos de campo		*Fecha de adquisición de las imágenes*
Fecha de inicio	*Fecha de final*	
26/07/2015	18/08/2015	25/08/2015
11/07/2016	01/09/2016	08/10/2016
29/08/2017	02/10/2017	14/08/2017

3.3. Aplicación de métodos de clasificación supervisada para la obtención de la cartografía de severidad de defoliación.

La clasificación digital puede definirse como el proceso de asignación de los píxeles de la imagen a un número de categorías informacionales en función de sus características espectrales, siendo ejecutada mediante herramientas informáticas y estadísticas. Su fortaleza radica en la necesidad de tener un conocimiento mínimo de la zona de estudio, véase con trabajo de campo, experiencia previa, documentos auxiliares (fotografía aérea o cartografía convencional) o estudios afines del lugar a clasificar (Chuvieco, 2010).

Se seleccionó un método de clasificación supervisada paramétrico y uno no paramétrico para confrontar los resultados obtenidos por cada uno de ellos, utilizándose en ambos todas las bandas reflectivas y los índices de vegetación anteriormente señalados. En concreto, dada su amplio uso en la literatura científica, se optó de entre los paramétricos por *Maximum Likelihood*, y entre los no-paramétricos por *Random Forest*. Los dos métodos (incluyendo sus respectivas fases de entrenamiento, asignación y verificación) están implementados en el software SNAP y se aplicaron con un doble objetivo:

- Crear una máscara forestal que facilite la posterior realización de la clasificación digital conducente a la obtención de distintas categoría de severidad de defoliación. Esta máscara es necesaria para soslayar el efecto de la heterogeneidad vegetal del área de estudio. Para llevarla a cabo se utilizó como referencia el Mapa Forestal de España y las ortoimágenes de 2015 del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Las categorías informacionales a clasificar fueron dos: forestal y no forestal.
- Obtener una cartografía con los niveles de severidad de defoliación sobre los píxeles clasificados como forestales. Este proceso se repitió dos veces con cada uno de los métodos, cambiando solamente las categorías informacionales empleadas al objeto de determinar el grado de detalle que se puede lograr para cartografiar la severidad de defoliación (Tabla 2):
    - En primer lugar se usaron como categorías informacionales las clases pre-establecidas en los criterios administrativos del Servicio de Sanidad Forestal del Gobierno de Aragón. A este respecto hay que señalar que en el área de estudio solamente estaban presentes, según los datos de campo, las categorías *defoliación ligera* y *defoliación moderada*.
    - En segundo lugar, se modificaron los criterios de la administración, teniendo solamente en cuenta las dos clases presentes en el área de estudio. Así, se distinguieron dos niveles para la clase *defoliación ligera* (*defoliación ligera baja* y *defoliación ligera alta*) y tres para la clase *defoliación moderada* (*defoliación moderada baja*, *defoliación moderada media* y *defoliación moderada alta*).

Tabla 2. Clases de defoliación según criterios administrativos y criterios modificados (estos últimos sólo llegan hasta el 59%, que es el valor máximo de defoliación en el área de estudio). Fuente: Servicio de Sanidad Forestal del Gobierno de Aragón y elaboración propia.

Criterios administrativos		*Criterios modificados*	
Clase	*Valor*	*Clase*	*Valor*
Defoliación nula	0-9%	-	-
Defoliación ligera	10-24%	Defoliación ligera baja	10-17%
		Defoliación ligera alta	18-24%
Defoliación moderada	25-59%	Defoliación moderada baja	25-37%
		Defoliación moderada media	38- 49%
		Defoliación moderada alta	50-59%
Defoliación grave	60-99%	-	-
Árbol muerto	100%	-	-

Finalmente, señalar que los estadísticos de validación de la fase de verificación se obtuvieron con el 50% de la muestra de la fase de entrenamiento, calculándose como métricas globales: (i) los promedios de los porcentajes de predicciones correctas de los distintos modelos ajustados, de su RMSE y de su sesgo (Bias); (ii) la identificación de la mejor-mejores variables independientes para la predicción; y (iv) el porcentaje de predicción correcta del mejor modelo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Máscara forestal

Tanto *Maximum Likelihood* como *Random Forest* arrojaron unos resultados estadísticos similares para el total de la serie temporal. La amplia utilización de *Random Forest* en cuestiones de clasificación de especies forestales y la menor cantidad de bandas empleadas fueron los dos motivos para seleccionar la máscara obtenida por este método.

4.2. Cartografía de severidad de defoliación

4.2.1. Comparación de los modelos de clasificación

La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos considerando las dos categorías informacionales de los *criterios administrativos*. Como en ella se observa, el método *Random Forest* obtiene unos mejores resultados en las tres anualidades en todos los estadísticos considerados: mayor porcentaje de predictores correctos, menor RMSE y Bias y mayor potencial de los mejores clasificadores (producto de la matriz de confusión). En la comparativa entre años, 2017 exhibe mayor robustez en el conjunto de sus estadísticos para ambos modelos con diferencias en los porcentajes próximas al 5-6%, lo que parece deberse a sus valores de defoliación más contrastados con respecto al resto.

Tabla 3. Estadísticos de validación obtenidos utilizando los *criterios administrativos*. Fuente: elaboración propia

Método de clasificación Maximum Likelihood						
Imágenes	*Promedio de predicciones correctas (%)*	*Promedio RMSE*	*Promedio Bias*	*Mejores variables*	*Mejor variable*	*Predicción correcta (%) del mejor modelo*
25/08/2015	75,46	0,50	0,10	B2, B3, B6, B11, NDWI, NBR, CRI	CRI	78,81
08/10/2016	74, 62	0,50	0,11	B2, B4, B6, B7, B8A, B11, NBR	B7	75,54
14/08/2017	80,84	0,44	-0,06	B5, B6, B7, B8A, B11, B12, NBR	B8A	84,67
Método de clasificación Random Forest						
25/08/2015	85,13	0,39	-0,03	B5, B7, B8A, B11	B11	89,96
08/10/2016	85,93	0,38	-0,01	B5, B6, B7, B11, MTCI	B7	88,69
14/08/2017	91,19	0,30	0,03	B5, B6, B7, B8A, B11, B12, MTCI	B8A	95,02

En cuanto a cuales son las bandas espectrales que resultan más relevantes para la obtención de la cartografía de severidad de defoliación, en ambos métodos de clasificación destacan la B5, B6, B7, B8A y B11, habiendo sido señalas todas ellas en estudios previos que han abordado el estudio de la defoliación mediante imágenes ópticas. Así, por ejemplo, Kumbula et al., (2019) ya señalaba la capacidad del *Red-edge* y del infrarrojo cercano para discriminar las cubiertas forestales afectadas por la defoliación (B5, B6, B7 y B8A), mientras que Rullan-Silva et al., (2013) y Sangüesa et al., (2014) muestran la importancia del SWIR (*Short-wave infrared*, infrarrojo de onda corta) y su relación con el descenso del contenido de agua y el aumento del estrés hídrico de las masas forestales afectadas por la defoliación. En cuanto a los índices de vegetación, señalar que los más relevantes son el CRI, NBR, MTCI y el NDWI. El CRI se vincula a la disminución de la concentración de carotenos en respuesta a la defoliación sufrida en ese momento (Gitelson et al., 2002; Hawrylo et al.,

2018), el NBR se asocia como detector de la presencia de plagas (Hawrylo et al., 2018; Sangüesa et al., 2014; Townsend et al., 2012); el MTCI a los cambios en el contenido de clorofila en las hojas (Dash y Curran, 2007; Hawrylo et al., 2018), guardando relación con la sensibilidad a la defoliación de las bandas situadas en el *Red-edge* (Hawrylo et al., 2018). Por último, el NDWI se relaciona a los cambios en el contenido de agua en la vegetación, y, por tanto, al estrés hídrico de las plantas (Rahimzadeh-Bajgiran et al., 2018).

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos considerando las cinco categorías informacionales de los *criterios modificados*. Como en ella se observa, todos los estadísticos considerados presentan valores más altos que cuando se utilizan los *criterios administrativos*, tanto con el método *Maximum Likelihood* como con el de *Random Forest*. Esto sucede tanto en las dos categorías en las que se dividía el *criterio administrativo* de *defoliación ligera* como en las tres que componen el de *defoliación moderada*.

Tabla 4. Estadísticos de validación obtenidos utilizando los *criterios modificados*. Fuente: elaboración propia

Clases de defoliación ligera						
Método de clasificación Maximum Likelihood						
Imágenes	*Promedio de predicciones correctas (%)*	*Promedio RMSE*	*Promedio Bias*	*Mejores variables*	*Mejor variable*	*Predicción correcta (%) del mejor modelo*
25/08/2015	87,00	0,36	-0,02	B2, B8, PSSR, NDVI, SAVI, MTCI	B8	90,96
08/10/2016	79,00	0,46	-0,08	B4, B5, B6, B8, B8A, B11, NBR	B4	87,38
14/08/2017	93,10	0,26	0,07	B8A, B11, B12	B8A	96,55
Método de clasificación Random Forest						
25/08/2015	87,57	0,35	0,06	B5, B6, B7, B8, B8A, NDWI, NBR	NBR	97,18
08/10/2016	91,59	0,29	-0,01	B5, B6, B7, B11, B12	B11	94,39
14/08/2017	94,83	0,23	0,02	B6, B7, B11	B7	92,28
Clases de defoliación moderada						
Método de clasificación Maximum Likelihood						
25/08/2015	98,68	0,11	-0,01	B2, B3	B3	98,68
08/10/2016	91,00	0,42	-0,06	B5, B8A, B12, PSSR, NDVI, NDWI	PSSR	95,00
14/08/2017	96,45	0,19	-0,04	B5, B7, B8, B11, B12, PSSR, NDWI	B7	99,49
Método de clasificación RandomForest						
25/08/2015	98,68	0,11	-0,01	B2, B3	B3	98,68
08/10/2016	93,00	0,36	0,05	B3, B5, B6, B7, B12	B12	97,00
14/08/2017	95,94	0,20	-0,02	B6, B7, B8A, B12	B12	98,68

En esta ocasión, los métodos de clasificación presentan ligeras diferencias en relación al tipo de clase analizada. En las clases de *defoliación ligera*, *Random Forest* produce mejores resultados en la mayoría de los estadísticos. En cambio, en las clases de *defoliación moderada*, los estadísticos son similares, con tenues diferencias anuales. Pese a tal matiz, *Random Forest* tiende a producir los mejores estadísticos para el conjunto de datos analizados, siendo identificado como el mejor método para obtener cartografía de severidad por defoliación, lo que es acorde con estudios previamente realizados (Latifi et al., 2014; Senf et al., 2015).

Si se observan las bandas más relevantes, existen similitudes con respecto a las clasificaciones mediante *criterios administrativos*, dado que las bandas B5, B6, B7, B8A, y B11 vuelven a situarse entre las más empleadas en los modelos de clasificación. Esto demuestra la significación de las regiones espectrales ya aludidas. A su vez, ganan presencia las bandas B2, B3, B4, señalándose la importancia la región del visible al igual que en otros estudios (Kumbula et al., 2019). Entre el resto de clasificadores comunes encontramos nuevos índices de vegetación, como el NDVI y el PSSR. El NDVI ha demostrado ser un preciso indicador de

confianza en la obtención de cartografía de defoliación, relacionándose con sus ventajas a la hora de aislar los daños medios de los bajos en masas forestales caducifolias afectadas (Spruce et al., 2011) y su elevada correlación con las clases de mayor severidad (Marx & Kleinschmit, 2017).

4.2.2. Caracterización de la severidad de la defoliación del área de estudio.

Los *criterios administrativos* muestran durante los dos primeros años patrones similares, predominando la *defoliación ligera* en la zona (Figura 2). En cambio, en 2017 se observa un brusco incremento de la *defoliación moderada*, afectando a más del 70% del área de estudio (74%), manifestando una mayor actividad de insectos y patógenos defoliadores para este último año. Esta situación es acorde a la información del área de estudio que tiene el Servicio de Sanidad Forestal. Según los umbrales de alerta establecidos por *UNECE ICP Forests Programme*, tales masas se catalogarían como debilitadas, dado que sobrepasan con creces el 25% de defoliación.

Por otra parte, la distribución geográfica de los datos resulta dispar en los tres años considerados. Durante el 2015 la *defoliación ligera* prevalece y se aprecian reducidos focos de *defoliación moderada* repartidos de manera desigual, como los situados al noreste de la Guarguera conectando con Silves o los ubicados al sudeste de la Sierra y Cañones de Guara. En 2016, los focos aludidos desaparecen y aumenta leve y uniformemente la *defoliación moderada*. Sin embargo, en el 2017 sucede a la inversa, viéndose perjudicada el total del área de estudio por niveles de defoliación mayores. Dentro de este patrón, destacan por su *defoliación moderada* los alrededores del río Arba de Biel, las zonas septentrionales de la Sierra de Santo Domingo y Caballera, las zonas centrales de San Juan de la Peña y Peña Oroel, el entorno de la Guarguera, el municipio de Silves y los límites del área de estudio con las sierras de Los Valles, Aisa y Borau.

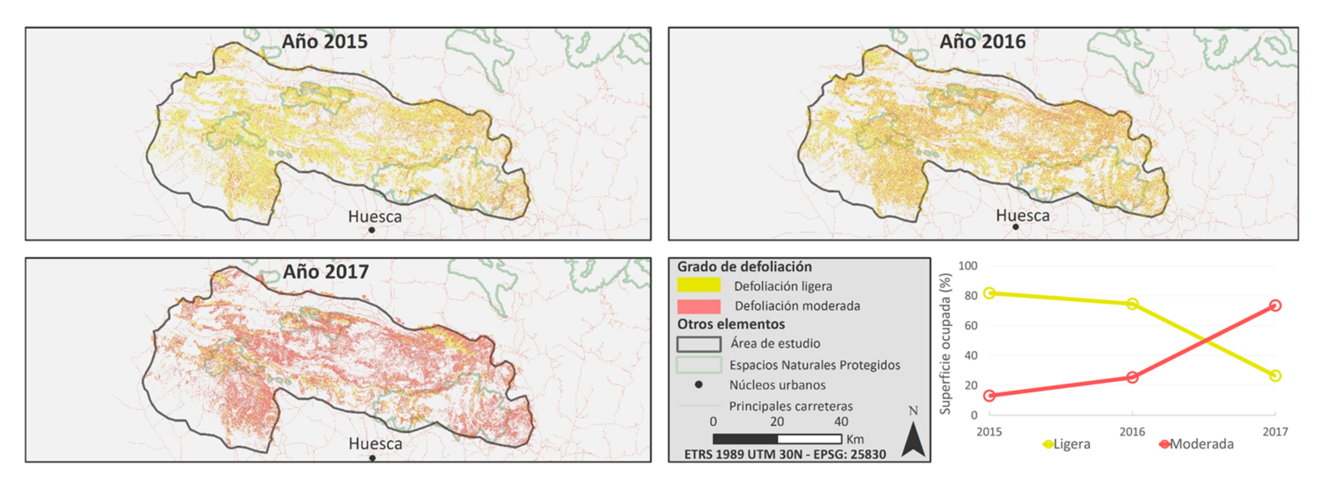


Figura 2. Cartografía de severidad de defoliación obtenida utilizando los *criterios administrativos*.

Los *criterios modificados* para el área de estudio permiten un análisis más profundo de la realidad de la zona respecto al parámetro estudiado (Figura 3). Así, se permite caracterizar en mayor grado las masas forestales que habían quedado encuadradas en la categoría *defoliación ligera* según los *criterios administrativos*, distinguiendo si estás están en la parte baja de esta clase (con porcentajes de defoliación de entre el 10 y el 17%, *defoliación ligera baja* según los *criterios modificados*) o en la parte superior (porcentajes entre el 18-24%, *defoliación ligera alta*). Estas últimas masas son las más susceptibles de pasar, al año siguiente, a la *categoría administrativa defoliación moderada*. La Figura 3 muestra que en los años 2015, 2016 y 2017 más del 75% de la superficie catalogada como *ligera* se encontraba en la categoría *ligera alta*. Por otro lado, la situación de *defoliación moderada* refleja cómo, en 2015, todas las masas que se habían incluido en esta categoría se encontraban en la parte baja de la distribución según los *criterios modificados*. Esta situación cambió en 2016, situándose ligeramente por encima del 50% las masas de *defoliación moderada media* y *moderada alta*. Finalmente, en 2017, gran parte de las masas catalogadas con *defoliación ligera alta* en 2016 habían evolucionado a la categoría *defoliación moderada baja* en 2017, dado que estas últimas constituyen más del 90% del 74% total clasificado como *moderada* en los *criterios administrativos*.

En cuanto a la distribución geográfica de los datos, se observa como en los años 2015 y 2016 predominan las defoliaciones ligeras altas sobre el resto de categorías. A su vez, en 2016 se detectan focos de *defoliación moderada media* en determinados lugares de la Sierra y Cañones de Guara, San Juan de la Peña y, especialmente, en Peña Oroel, así como en las zonas centrales y septentrionales de la Guarguera, llegando a conectar con los alrededores de Silves. También despuntan algunos focos de *defoliación moderada alta* al norte de las Sierras de Santo Domingo y Caballera, aunque son prácticamente testimoniales. Durante el 2017, predomina sobre el total del área de estudio la *defoliación moderada baja*, coincidiendo con la distribución de los daños de *defoliación moderada* pertenecientes a los *criterios administrativos*. Sin embargo y a diferencia del resto de imágenes, apenas observan las dos clases de *defoliación ligera*, llegándose únicamente a apreciar en algunos sectores la categoría de defoliaciones ligeras altas.

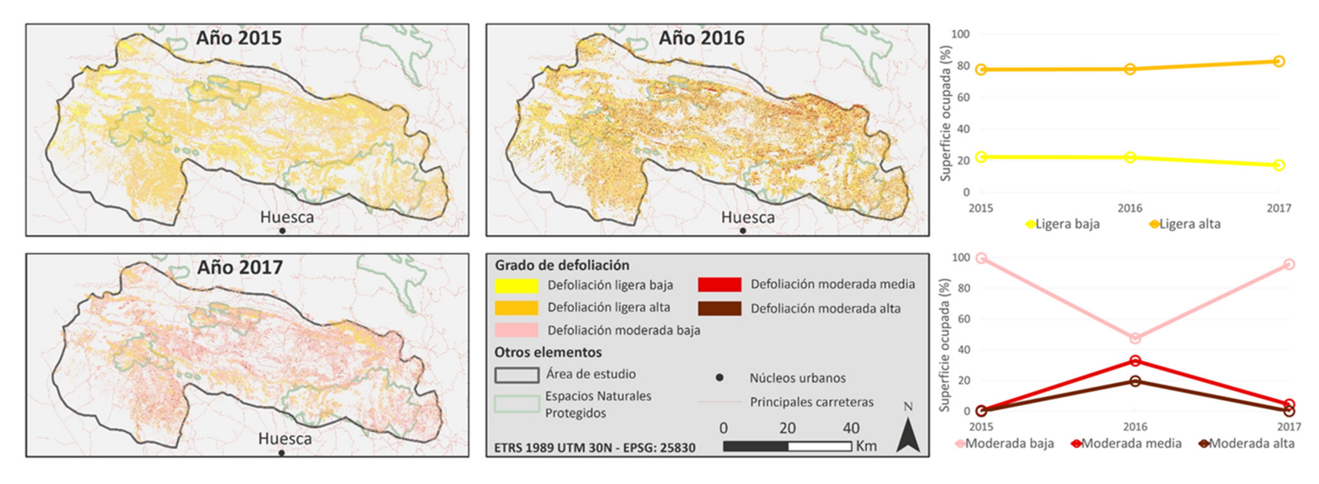


Figura 3. Cartografía de severidad de defoliación obtenida utilizando los *criterios modificados*.

5. CONCLUSIONES

El empleo de imágenes ópticas Sentinel-2 posibilita la obtención de cartografía de severidad de la defoliación y el análisis de su comportamiento temporal, superando las limitaciones que los inventarios puntuales de campo tienen para caracterización continua de este fenómeno en un territorio a escalas medias. Los *criterios administrativos* han obtenido buenos resultados en el proceso de clasificación, pero no aprovechan todo el potencial de las imágenes para caracterizar de forma más precisa, espacial y temáticamente, el área de estudio. En cambio, los resultados estadísticos obtenidos en los *criterios modificados* son iguales o mejores que en los *criterios administrativos*, posibilitando un análisis más profundo y detallado de la realidad de la zona en consideración de sus características y patrones. *Random Forest* se erigió como el mejor método de clasificación y de estimación de la severidad, demostrando una mejor validación estadística. Así, se ha conseguido diseñar una metodología efectiva de trabajo mediante software libre de cara al análisis de la severidad de la defoliación. Sus resultados contribuyen a mejorar el estudio de las masas forestales desde una perspectiva novedosa para la administración aragonesa obteniendo, entre sus múltiples ventajas, cartografías con gran valor potencial útiles en las políticas de prevención, conservación y planificación forestal.

AGRADECIMIENTOS

Al Servicio de Sanidad Forestal del Gobierno de Aragón y, en particular, a Iñaki Lázaro y a Lorenzo Serrano.

6. BIBLIOGRAFÍA

Bárta, V., Lukeš, P., Homolová, L. (2021). Early detection of bark beetle infestation in Norway spruce forests of Central Europe using Sentinel-2. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 100, 102335. https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102335

Blackburn, G.A. (1998). Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 19(4), 657-675. https://doi.org/10.1080/014311698215919

Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona: Ariel.

Daughtry, C.S.T., Walthall, C.L., Kim, M.S., Brown de Colstoun, E., McMurtrey, J.E. (2000). Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74, 229-239. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9

Dash, J., Curran, P.J. (2007). Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI). *Advances in Space Research*, 39, 100-104. https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.02.034

Frampton, W.J., Dash, J., Watmough, G., Milton, E.J. (2013). Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 83-92. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007

Gao, B.C. (1996). NDWI-A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3

Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Merzlyak, M.N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote sensing of environment*, 58, 289-298. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7

Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N., Chivkunova, O.B. (2001). Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology*, 74, 38-45. https://doi.org/10.1562/0031-8655(2001)074<0038:OPANEO>2.0.CO;2

Gitelson, A.A., Zur, Y., Chivkunova, O.B., Merzlyak, M.N. (2002). Assesing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. *Photochemistry and Photobiology*, 75, 272-281. https://doi.org/10.1562/0031-8655(2002)0750272ACCIPL2.0.CO2

Gobierno de Aragón (2008). *Redes de evaluación fitosanitaria en las masas forestales de Aragón*. Zaragoza: Gobierno de Aragón. Departamento de Medio Ambiente. https://bibliotecavirtual.aragon.es/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=3714823

Gobierno de España (2017). *Inventario de daños forestales (IDF) en España. Red europea de Seguimiento de Daños en los Bosques (Red de Nivel I)*. Madrid: Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventariodedanosforestales2017_tcm30-441605.pdf

Gottardini, E., Cristofolini, F., Cristofori, A., Pollastrini, M., Camin, F., Ferretti, M. (2020). A multi-proxy approach reveals common and species-specific features associated with tree defoliation in broadleaved species. *Forest Ecology and Management*, 467, 118151. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118151

Hawryło, P., Bednarz, B., Wężyk, P., Szostak, M. (2018). Estimating defoliation of Scots pine stands using machine learning methods and vegetation indices of Sentinel-2. *European Journal of Remote Sensing*, 51, 194-204. https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1417745

Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 253, 295-309. https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X

Key, C.H., Zhu, Z., Ohlen, D., Howard, S., McKinley, R., Benson, N. (2002). "The normalized burn ratio and relationships to burn severity: ecology, remote sensing and implementation". En J.D. Greer (Ed.), *Proceedings of the Ninth Forest Service Remote Sensing Applications Conference*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

Kumbula, S.T., Mafongoya, P., Peerbhay, K.Y., Lottering, R.T., Ismail, R. (2019). Using Sentinel-2 Multispectral Images to Map the Ocurrence of the Cosid Moth (Coryphodema tristis) in Eucalyptus Nitens Plantations of Mpumalanga, South Africa. *Remote Sensing*, 11, 278. https://doi.org/10.3390/rs11030278

Latifi, H., Schumann, B., Kautz, M., Dech, S. (2014). Spatial characterization of bark beetle infestations by a multidate synergy of SPOT and Landsat imagery. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 441–456. https://doi.org/10.1007/s10661-013-3389-7

Marx, A., Kleinschmit, B. (2017). Sensitivity análisis of RapidEye spectral bands and derived vegetation indices for insect defoliation detection in pure Scots pine stands. *iForest*, 10, 659-668. https://doi.org/10.3832/ifor1727-010

Meng, R., Dennison, P.E., Zhao, F., Shendryck, I., Rickert, A., Hanavan, R.P., Cook, B.D., Serbin, S.P. (2018). Mapping canopy defoliation by herbivorous insects at the individual tree level using bi-temporal airbone

imaging spectroscopy and LIDAR measurements. *Remote Sensing of Environment*, 215, 170-183. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.008

Millar, C.I., Stephenson, N.L. (2015). Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance. *Science*, 349, 823-826. DOI: 10.1126/science.aaa9933

Müller-Wilm, U. 2017. *S2 MPC. Sen2Cor configuration and user manual*. European Space Agency (ESA). https://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.4.0/Sen2Cor_240_Documenation_PDF/S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.4.0.pdf

Rahimzadeh-Bajgiran, P., Weiskittel, A.R., Kneeshaw, D., MacLean, D.A. (2018). Detection of Annual Spruce Budworn Defoliation and Severity Classification Using Landsat Imagery. *Forests*, 9, 357. https://doi.org/10.3390/f9060357

Rengarajan, R., Schott, J.R. (2018). Evaluation of Sensor and Environmental Factors Impacting the Use of Multiple Sensor Data for Time-Series Applications. *Remote Sensing*, 10, 1678. https://doi.org/10.3390/rs10111678

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deerin, W.D. (1974). "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS". En S. C. Fraden, E. P. Marcanti, M. A. Becker (Eds.), *Third ERTS 1 Symposium*, pp. 309-317. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf

Rullan-Silva, C.D., Olthoff, A. E., Delgado de la Mata, J.A., Pajares-Alonso, J.A. (2013). Remote sensing of forest insect defoliation. A review. *Forest systems*, 22, 377-391. https://doi.org/10.5424/fs/2013223-04417

Sangüesa, G., Camarero, J. J., García-Martín, A., Hernández, R., de la Riva, J. (2014). Remote-sensing and tree-ring based characterization of forest defoliation and growth loss due to the Mediterranean pine processionary moth. *Forest Ecology and Managament*, 320, 171-181. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.008

Senf, C., Pflugmacher, D., Wulder, M. A., Hostert, P. (2015). Characterizing spectral-temporal patterns of defoliator and bark beetle disturbances using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 170, 166-177. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.019

Spruce, J.P., Sader, S., Ryan, R.E., Smoot, J., Kuper, P., Ross, K., Prados, D., Russell, J., Gasser, G., McKellip, R., Hargrove, W. (2011). Assessment of MODIS NDVI time series data products for detecting forest defoliation by gypsy moth outbreaks. *Remote Sensing of Environment*, 115, 427-437. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.09.013

Townsend, P.A., Singh, A., Foster, J.R., Rehberg, N.J., Kingdon, C.C., Eshleman, K.N., Seagle, S.W. (2012). A general Landsat model to predict canopy defoliation in broadleaf deciduous forests. *Remote Sensing of Environment*, 119, 255-265. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.023

Zarco-Tejada, P.J., Hornero, A., Hernández-Clemente, R., Beck, P.S.A. (2018). Understanding the temporal dimension of the red-edge spectral region for forest decline detection using high-resolution hyperspectral and Sentinel-2a imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 137, 134-148. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.01.017



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 257-266

La isla de calor urbana en Zaragoza: una aproximación enfocada a la modelización geotérmica

P. Gabás Alcaine[1], J. de la Riva Fernández[1], E.A. Garrido Schneider[2], A. García Gil[3]

[1] Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, C. Pedro Cerbuna 12, 50.009 Zaragoza.
[2] Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN-IGME, CSIC), Unidad de Zaragoza, C. Manuel Lasala 44, 9ºB, 50.006 Zaragoza.
[3] Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN-IGME, CSIC), C. Ríos Rosas 23, 28.003 Madrid.

pablogalcaine@gmail.com, delariva@unizar.es, e.garrido@igme.es, a.garcia@igme.es

RESUMEN: El presente estudio tiene por objeto generar valores distribuidos de la temperatura de la superficie terrestre en la ciudad de Zaragoza, que permitan reinterpretar el fenómeno de la isla de calor en su casco urbano y ayudar a establecer una condición de contorno empírica para el parámetro temperatura en el límite superior de un modelo matemático de flujo subterráneo y transporte de calor. Este modelo es una herramienta creada por el IGME y la CHE, utilizada en la simulación del impacto de vertidos térmicos al acuífero de la ciudad, que ha demostrado ser eficaz en la gestión sostenible de numerosos aprovechamientos geotérmicos con aguas subterráneas de Zaragoza. En este sentido, mediante el uso de la teledetección y los sistemas de información geográfica, se han calculado, interpretado y adecuado los datos térmicos de la plataforma espacial Landsat, apoyándose conjuntamente con el uso de índices de vegetación NDVI. A su vez, se ha creado una metodología de trabajo basada en el empleo y la manipulación de las fuentes catastrales existentes, en relación a los requerimientos del proyecto y las partes interesadas. Los resultados, permiten averiguar el funcionamiento y la configuración de la isla de calor en la ciudad, sus causas, su influencia, sus factores dominantes, sus variaciones espacio-temporales y sus comportamientos térmicos-NDVI derivados, así como la obtención de nuevas herramientas cartográficas de trabajo destinadas a futuras y novedosas líneas de investigación, como son los mapas de usos del suelo catastrales, los mapas de profundidades de edificación y las consecuentes temperaturas superficiales terrestres adaptadas a la condición de contorno del modelo matemático de flujo subterráneo y de transporte de calor.

Palabras-clave: geotermia, modelo hidrogeológico, acuífero, catastro, teledetección y SIG.

1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

El origen de las civilizaciones se ha ligado a la implantación del ser humano en el territorio, adaptándolo y ordenándolo en relación a sus necesidades. Ya en los inicios de las sociedades el ser humano aprovechaba los recursos existentes en el medio en vistas a su lucha y supervivencia contra determinados factores físicos extremos, como los relacionados con el clima; aunque con escaso impacto en lo que a la transformación de su entorno se refiere. Con la llegada de las sociedades industriales y la concentración de la población en las ciudades se genera una verdadera demanda de materia y de energía, con frecuencia objeto de aprovechamiento ineficientemente y transformación en calor y residuos. Es el caso de los regímenes de energía fósil, principal fuente de energía, materializándose en graves problemáticas ambientales y la búsqueda actual de nuevas alternativas energéticas. Entre éstas destaca la energía geotérmica, que ha experimentado un creciente uso en las últimas décadas, especialmente en relación con los recursos geotérmicos someros y su explotación mediante sistemas abiertos, que requieren en la mayoría de los casos de cierto control y regulación para su correcto funcionamiento. La explotación del recurso geotérmico presente en las masas de agua subterránea implica una serie de beneficios relacionados con los sistemas de climatización, requiriendo, en el caso de los sistemas geotérmicos de tipo abierto con bomba de calor, la captación de agua subterránea y la devolución al acuífero de un vertido térmico con mayor o menor temperatura que el agua captada, dependiendo de si es resultado de un proceso de refrigeración o calefacción. A tales efectos, se ha demostrado que se genera un impacto térmico tras la incorporación del vertido térmico al acuífero (Garrido et al., 2016),

siendo de gran interés para el Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) y la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), como Administración competente en materia de gestión del agua, conocer su alcance y consecuencias. Para la cuantificación y valoración de este impacto se ha elaborado un modelo matemático de flujo subterráneo y transporte de calor del acuífero urbano, cuyo funcionamiento requiere establecer una serie de condiciones de contorno y conocer los límites, como la posición de las zonas saturada y no saturada, las características intrínsecas del acuífero y las variables dependientes de este (García, 2015).

La teledetección y los sistemas de información geográfica pueden jugar un papel importante en la resolución de algunas incertidumbres asociadas a la determinación de valores de algunos parámetros que definen el contorno del citado modelo en el límite de la superficie del terreno. Puede ser el caso de los valores distribuidos de la temperatura superficial terrestre, condición de contorno imprescindible a la hora de simular las transferencias verticales del calor a través de la zona no saturada del acuífero hasta alcanzar la superficie del terreno. Al mismo tiempo, su interpretación posibilita comprender el medio urbano y sus características, en especial su clima y los fenómenos resultantes (isla de calor), tema de elevado interés ante la importancia actual de las ciudades, fruto de su crecimiento demográfico exponencial y sus condiciones y requisitos de habitabilidad. Así pues, el presente estudio tiene por objeto la obtención e interpretación de las variables mencionadas para la ciudad de Zaragoza, enmarcándose en las necesidades evidenciadas en el proyecto de colaboración entre el IGME y la CHE: "Aplicación de un modelo de flujo y transporte de calor para la simulación y alternativas de gestión de aprovechamientos geotérmicos en la ciudad de Zaragoza".

2. ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Zaragoza, capital de la Comunidad Autónoma de Aragón, está ubicada en el NE peninsular español, en el centro de la Depresión del Ebro, en la confluencia entre el río Ebro y sus afluentes Gállego y Huerva, conformándose como punto neurálgico con 675.301 habitantes (IAEST, 2021) y eje de vertebración territorial. La ciudad presenta un relieve plano, sin grandes diferencias altitudinales, entre 180 y 220 m s.n.m. En su localización y desarrollo ha tenido gran trascendencia la red hidrográfica y sus morfologías fluviales sobre gravas y arenas, atravesando la ciudad longitudinalmente y diferenciando ambas márgenes con notable influencia sobre el planeamiento urbano. Así, se observan formaciones meandriformes y claros niveles de terraza, de una cota media inferior en la margen izquierda. En términos hidrogeológicos, la ciudad se emplaza sobre dos importantes masas de agua subterráneas (Garrido et al., 2010): los aluviales del Ebro y del Gállego. Ambos constituyen acuíferos libres de naturaleza detrítica unidos en la confluencia Ebro-Gállego, que se simplifican en uno a efectos de conocimiento de sus características y control de su relevante explotación y contaminación. El acuífero aluvial se desarrolla en los niveles de terrazas, mostrando espesores distintos, fruto de los procesos kársticos producidos sobre formaciones evaporíticas. El área de estudio engloba tanto la ciudad como su periferia, siendo coincidente con los límites del modelo de flujo y transporte de calor, que respeta el contorno urbano consolidado (Figura 1). Procede señalar que el clima de la ciudad de Zaragoza ha sido objeto de estudios previos en Cuadrat et al. (1993, 2005, 2015 2022) y de la Riva et al. (1997).

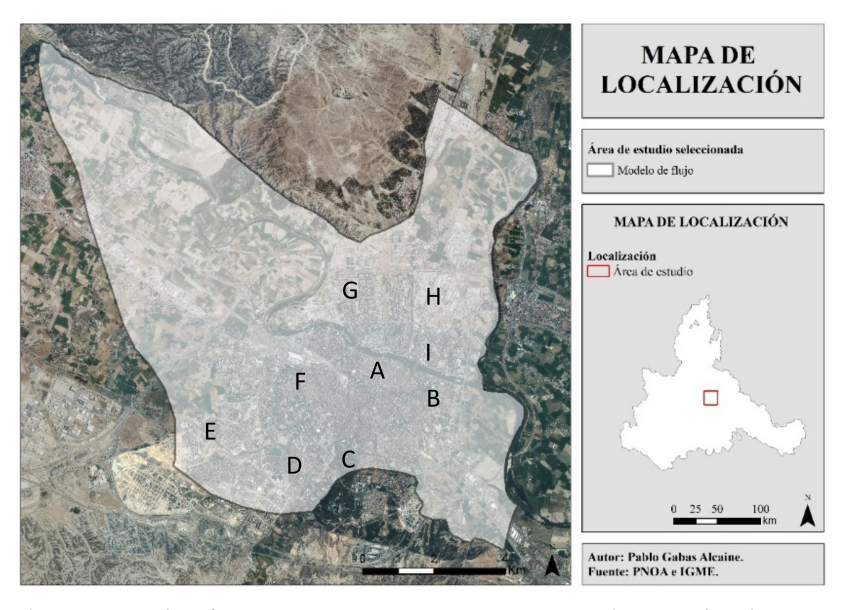


Figura 1. Área de estudio. A: Casco histórico; B: Las Fuentes; C: Parque Grande J.A, Labordeta; D: Casablanca; E: Valdefierro; F: Delicias; G: Actur; H: Polígono Industrial Cogullada; I: El Vado.

3. METODOLOGIA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

3.1. Tratamiento de las imágenes

Para obtener las temperaturas de superficie (LST, *Land Surface Temperature*) se seleccionaron inicialmente imágenes acordes a un criterio mensual de carácter unitemporal durante el período 2010-2017, siendo este significativo de cara al estudio de la ciudad y sus características en el presente, empleando la plataforma espacial Landsat debido a la gran disponibilidad de datos durante el periodo propuesto y la buena resolución de sus sensores (Chuvieco, 2010). De esta forma, se emplearon imágenes de los satélites Landsat 5 y 8, excluyendo los errores del sensor introducidos por Landsat 7. Teniendo en cuenta la disponibilidad de las imágenes, éstas fueron visualmente evaluadas en un segundo exploratorio, interpretando la situación sinóptica mediante el uso de fuentes climáticas y meteorológicas (AEMET, Meteociel.fr y Sistema CALIOPE). Se incluyeron finalmente las más adecuadas, descargando los productos radiométricamente corregidos. Posteriormente, las bandas utilizadas para la obtención de las temperaturas fueron 3 por cada satélite: rojo, banda 3 en Landsat 5 y 4 en Landsat 8; infrarrojo próximo, banda 4 en Landsat 5 y 5 en Landsat 8; térmico, banda 7 en Landsat 5 y, por recomendación de los técnicos del USGS, banda 10 en Landsat 8 (USGS, 2016).

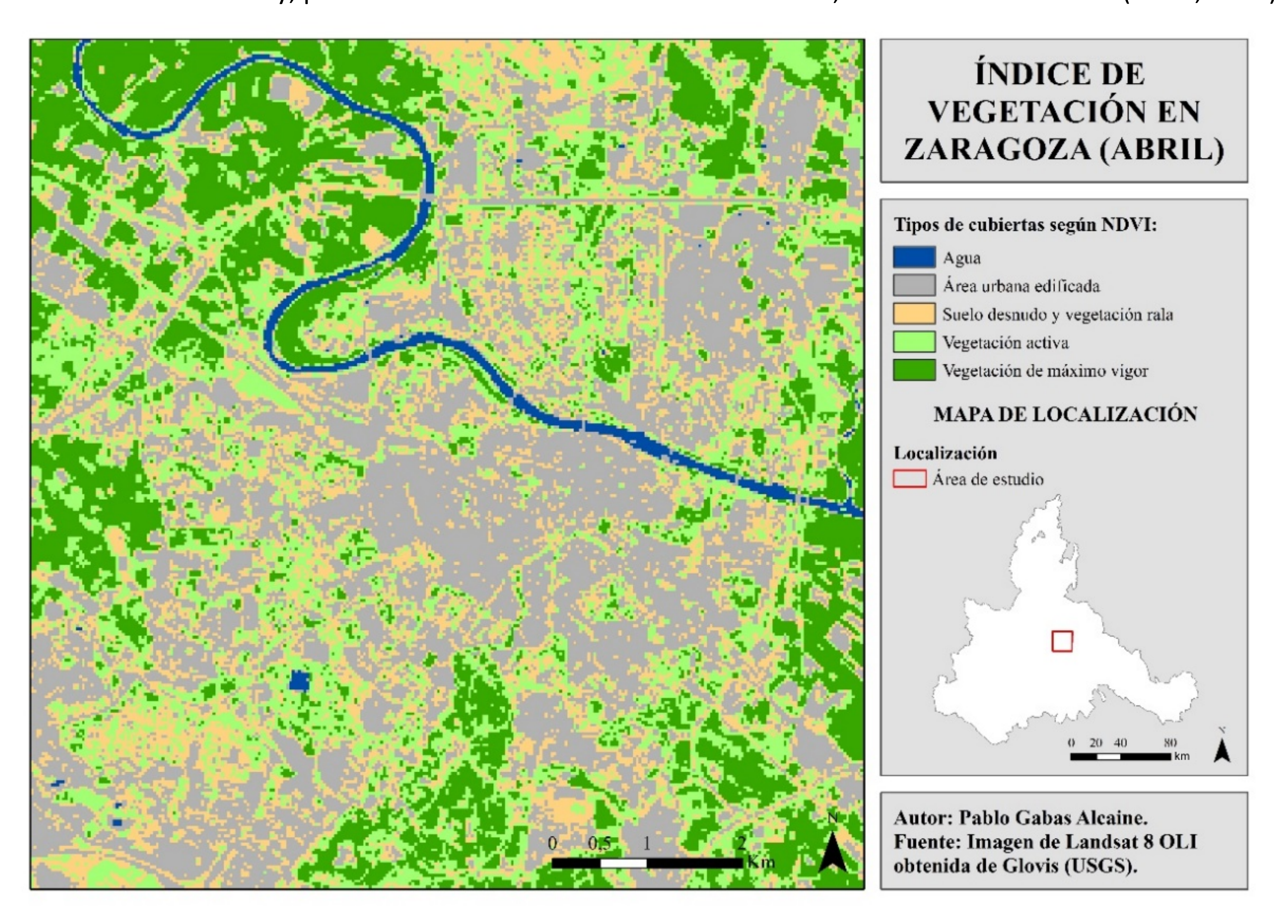


Figura 2. Mapa NDVI del mes de abril.

Las bandas del rojo e infrarrojo próximo fueron destinadas a la obtención de la emisividad. Se valoraron los procedimientos existentes en la bibliografía, escogiendo finalmente el método de cálculo de la emisividad mediante el uso de NDVI creado por Van den Griend & Owe (1993) y aplicado por Valor & Caselles (1996). Obtenidos los datos, se ajustaron los intervalos de emisividad (Ferrer y Solé, 1995) a cada realidad de estudio analizada (Sobrino et al., 2001), incluyendo un valor específico para cada agrupación (Curran, 1985) y creando cartografías en función del NDVI y la emisividad (Figura 2).

Finalmente, se valoraron los métodos de cálculo de la temperatura superficial terrestre, escogiendo el de Curran (1985) debido a su simplicidad en términos de número de variables utilizadas y buenos resultados. Si bien es cierto que tal método hace obviar las variables atmosféricas influyentes, su desconsideración permite sortear la introducción de ruido en el proceso y resultados, además de no ser de objeto de interés los valores termométricos absolutos, sino más bien los patrones espaciales térmicos y su evolución temporal (Eq. 1).

$$T_{ter} = \frac{T_{rad}}{\sqrt[4]{\varepsilon}}$$ Formulación de Curran (1985) (1)

donde T_{rad} es temperatura radiante, Ɛ emisividad efectiva y T_{ter} temperatura termométrica o cinética.

3.2. Información catastral

La metodología seguida para la adecuación de la información obtenida mediante teledetección al modelo matemático de flujo subterráneo y transporte de calor del acuífero urbano, fundamentado en esquemas conceptuales como el de Farr et al. (2017) para la ciudad de Cardiff (Figura 3), llevó a tener en cuenta la influencia térmica de los edificios y sus vacíos espacios volumétricos subterráneos sobre los registros de temperatura suelo, subsuelo y acuífero.

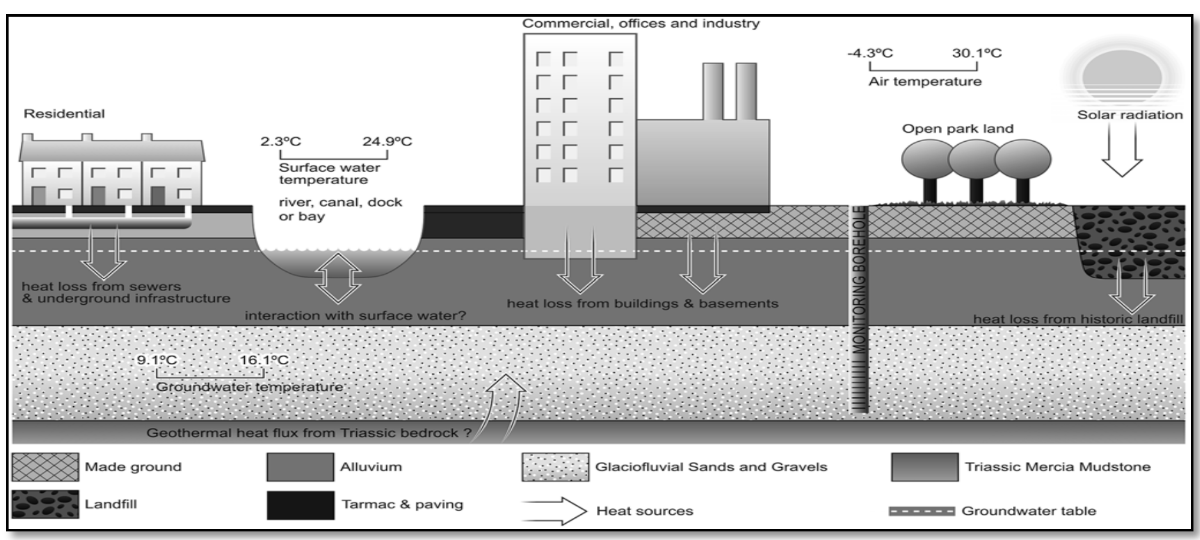


Figura 3. Modelo conceptual de las posibles fuentes de calor a las aguas subterráneas en Cardiff (Farr et al., 2017).

De cara a extraer los comportamientos térmicos urbanos en relación al tipo de material y cubierta, se evaluaron las fuentes catastrales disponibles, descargando finalmente la información en formato vectorial de la Sede Electrónica del Catastro (SEC). Entre los archivos obtenidos, se consideraron los datos espaciales relacionados con la edificabilidad y usos del suelo para el área de estudio, teniendo en cuenta el campo con historia de las zonas rurales y urbanas. Después se decodificó su lenguaje y se agruparon en categorías de usos del suelo catastrales, extrayendo aquellas clases de mayor interés para el proyecto. Algunos de los elementos de la ciudad, como los ríos y canales, calles y redes viarias, no se encontraban disponibles en ese momento, por lo que fueron digitalizados e integrados mediante SIG usando ortofotografías aéreas de alta resolución espacial acordes al periodo y zona de estudio.

Por otro lado, la información aportada por el catastro permitió distinguir aquellos lugares provistos de garajes de los que no lo están, junto al tipo de edificaciones subterráneas y sus volúmenes edificatorios en profundidad (metros). Posteriormente se extrajeron las temperaturas superficiales menos influenciadas por los elementos urbanos ajenos, como las calles con garajes, las calles sin garajes y las calles en general; siendo geométricamente adaptadas a los límites del modelo matemático y finalmente integradas por el IGME.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. La isla de calor urbana

Para mejorar el análisis de la isla de calor urbana en Zaragoza, se han empleado tanto termografías como cartografías NDVI y composiciones de banda térmica, NDVI y visible, facilitando la interpretación del fenómeno. Complementariamente, se ha abordado el uso de perfiles de temperatura y NDVI multidireccionales, trazándose sobre aquellos lugares significativos de la ciudad.

De esta forma, la isla de calor aparece apagada durante los meses invernales, apreciándose perfectamente en su interior la presencia de focos térmicos (Figura 4), como los presentes en los polígonos industriales, caso de la fábrica Saica.

TEMPERATURA DE SUPERFICIE EN ZARAGOZA (FEBRERO)

Temperatura (ºC)
< 10,5
10,5 - 12,5
12,5 - 13,5
13,5 - 14,5
14,5 - 15
15 - 15,5
15,5 - 16
16 - 16,5
16,5 - 17,5
17,5 - 18,5
18 - 19,5
19,5 - 21,5
> 21,5

Otros elementos cartográficos
Límite de la ciudad consolidada

0 0,5 1 2 km
N

Autor: Pablo Gabas Alcaine.
Fuente: Imagen de Landsat 8 OLI obtenida de Glovis (USGS).

Figura 4. Termografía de febrero.

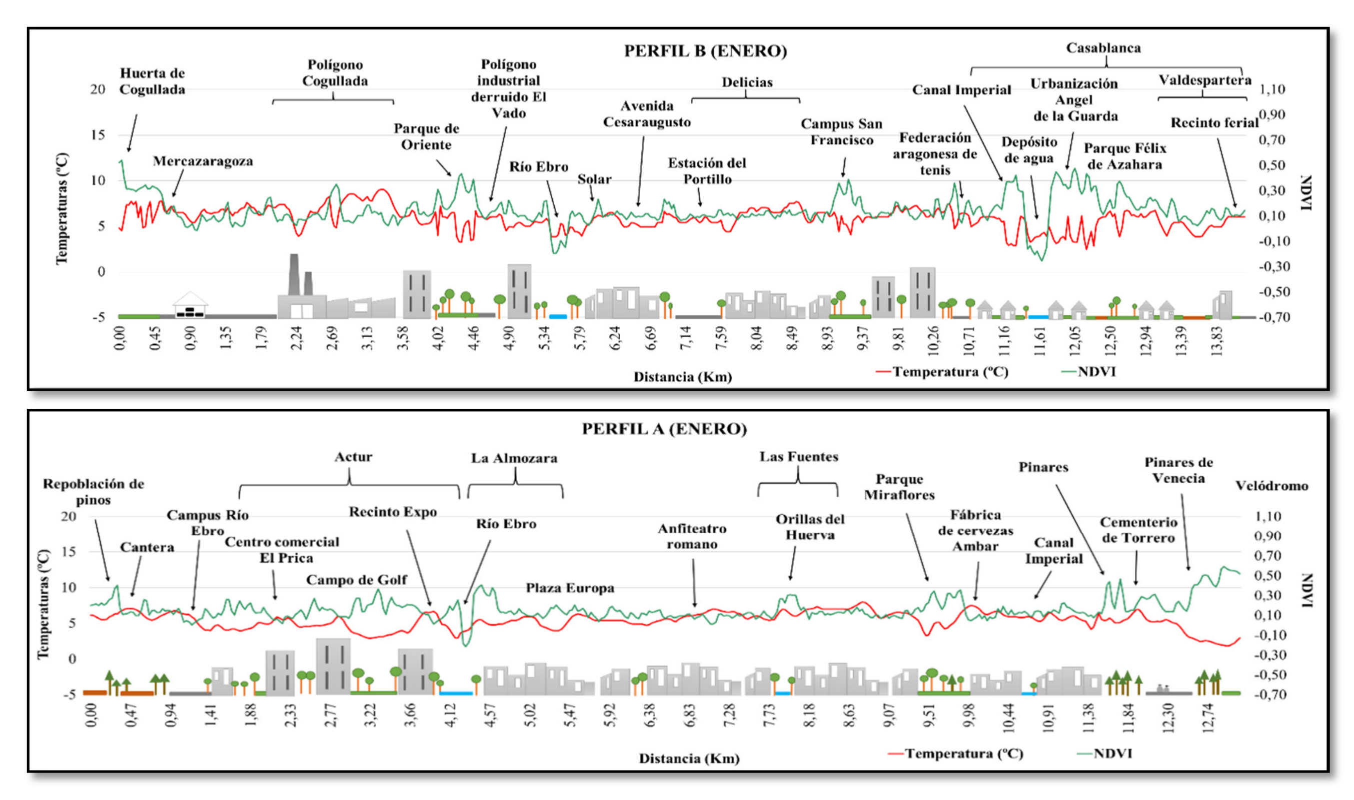


Figura 5. Perfiles térmicos-NDVI.

Como resultado, se genera un perfil espacial de escasos contrastes (Figura 5), ocultándose el efecto de la vegetación como consecuencia de su parada vegetativa y destacando la existencia de otros factores causales vinculados a las características térmicas de los materiales, tales como la rugosidad, el viento o las ya aludidas fuentes de calor antrópicas.

En cambio, conforme avanza la estacionalidad, hacen acto de presencia los factores astronómicos, aumentando la incidencia solar y el consecuente calentamiento de los materiales, incrementando la extensión e intensidad de la isla de calor hasta alcanzar su máxima expresión en los meses estivales (Figura 6). En estas fechas, resalta el efecto del agua y la vegetación, conformando frescos corredores térmicos en la ciudad que delimitan las grandes manchas de calor. De esta manera, los contrastes intraurbanos son evidentes, apreciándose unas temperaturas inferiores en los barrios conformados por tejidos urbanos discontinuos, a diferencia de los barrios centrales de superior densidad edificatoria, como el Centro. Cuestiones que pueden verse perturbadas ante el efecto del viento, alterando los patrones térmicos aludidos y desplazando las altas temperaturas a los sectores de carácter impenetrable. En el otro extremo resaltan los polígonos industriales, coincidiendo permanentemente con los sectores más cálidos de la ciudad, haciéndose evidente la ausencia de vegetación, las características térmicas de los materiales y su distanciamiento de la red hidrográfica.

Todo ello se materializa en la identificación y caracterización de 8 patrones o comportamientos térmicos diferentes (Figura 7), que se distinguen en función del espacio urbano edificado, su morfología y el tipo de cubiertas presentes en la ciudad, apareciendo la vegetación como uno de los factores causales dominantes junto a las masas de agua:

- Tejido urbano discontinuo de elevada altura edificatoria, caracterizado por sus suaves oscilaciones térmicas donde se aprecia el efecto del viento y la vegetación, caso del barrio del Actur.
- Tejido urbano discontinuo de baja altura, caracterizado por sus amplias oscilaciones y bajas temperaturas, fruto de la mayor densidad de zonas verdes, muy vulnerable al efecto del viento, como las urbanizaciones unifamiliares de Casablanca.

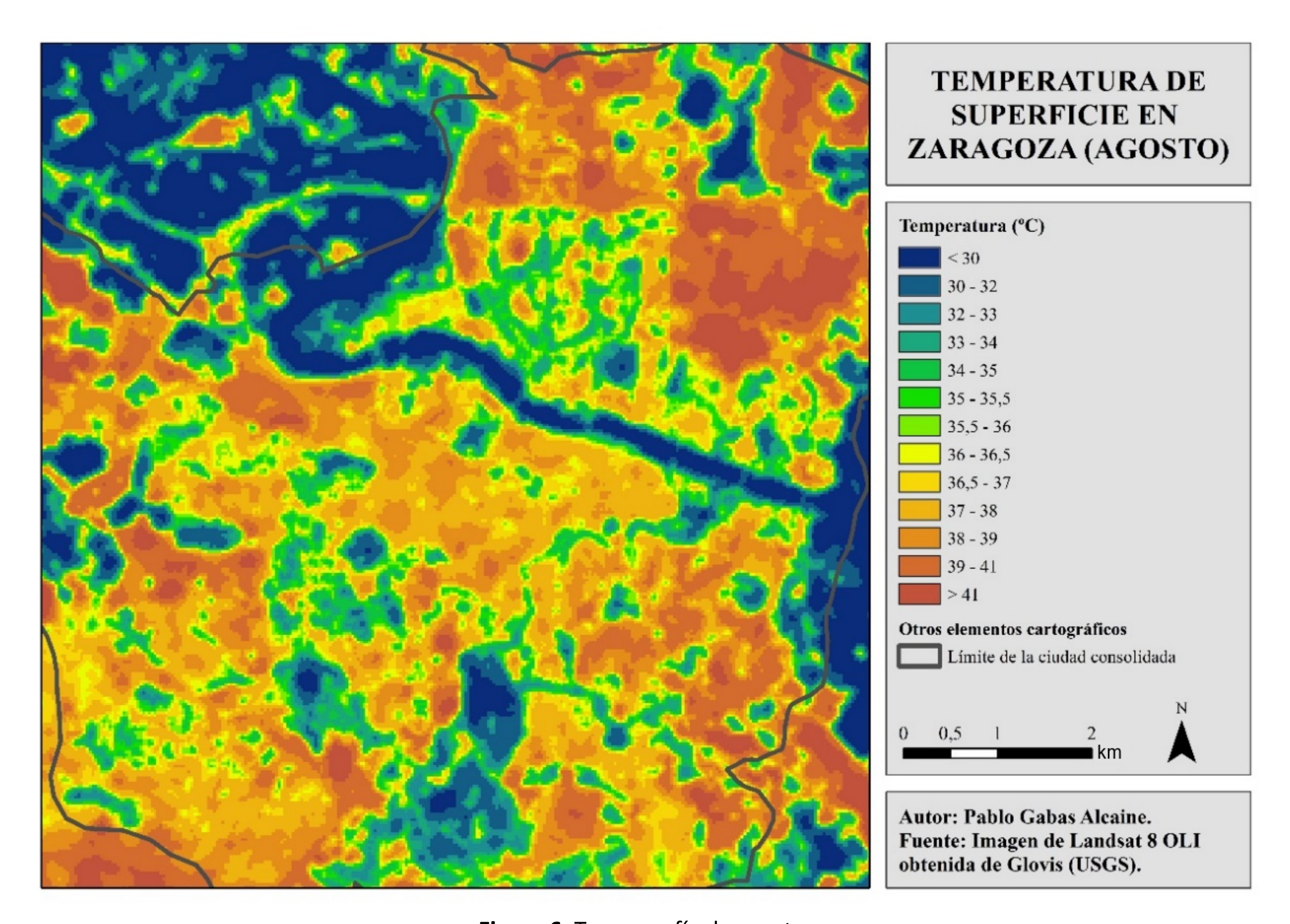


Figura 6. Termografía de agosto.

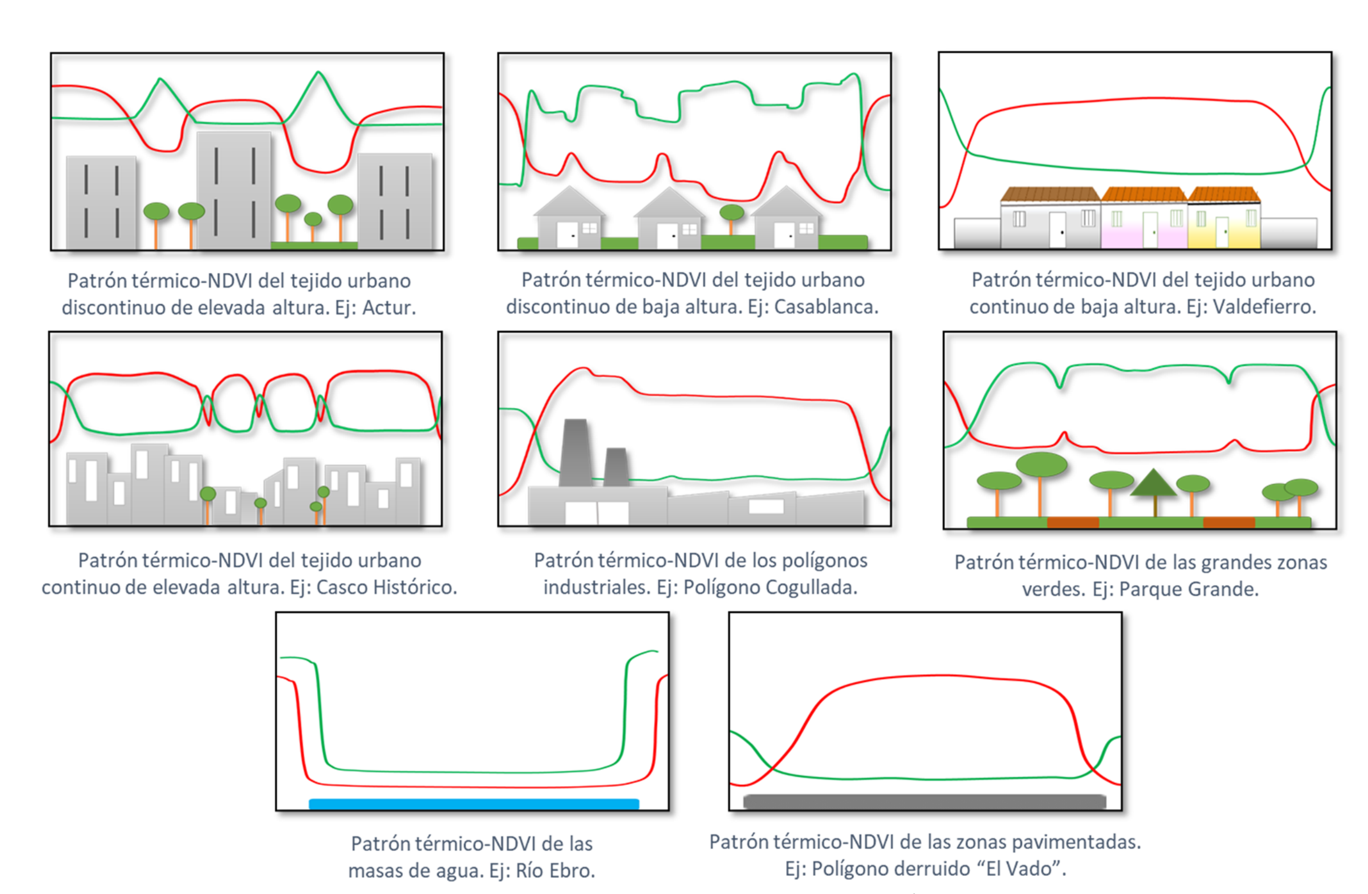


Figura 7. Patrones térmicos-NDVI idealizados a partir de los datos registrados (las líneas roja y verde representan de forma simplificada los perfiles de temperatura y NDVI, respectivamente).

- Tejidos urbano continuo de baja altura, donde la presencia de vegetación es nula, generando grandes mesetas térmicas, como es el caso de Valdefierro y su denso tejido urbano de antiguas viviendas de autoconstrucción.
- Tejido urbano de elevada altura en edificación, de altas temperaturas uniformes pero reflejando sus estrechas calles arboladas y pequeñas plazas, agudas y reducidas oscilaciones en su perfil, como el Casco Histórico.
- Polígonos industriales, caracterizados por sus extremas temperaturas permanentes en forma de montañas de calor y con picos intensificados en las fábricas, caso del polígono industrial de Cogullada y de la planta de Saica.
- Grandes zonas verdes y su característico enfriamiento térmico, dispar en relación al tipo de especie y su vigor vegetal, siendo lugares de fácil acceso para el viento, como el Parque Grande.
- Masas de agua, caracterizadas por generar un fuerte descenso térmico en su perfil con notable influencia sobre los sectores limítrofes, caso del río Ebro y las riberas.
- Extensas zonas pavimentadas, caracterizadas por sus altas temperaturas y uniforme perfil a raíz de su escasa rugosidad, las características térmicas de sus superficies, nula vegetación y elevada exposición solar, como el antiguo polígono derruido de El Vado.

4.2. La aplicación de los datos al modelo

La metodología propuesta para la adecuación de los datos al modelo acorde a las necesidades del IGME, ha dado a lugar a la obtención de novedosas herramientas cartográficas. Como se puede apreciar en la Figura 8, el mapa de usos del suelo justifica el comportamiento térmico estudiado en relación al tipo de cubierta-material y permite ubicar la posición de los garajes y en qué lugares se asientan. En cambio, el mapa de profundidades cuantifica el volumen de tales edificaciones y, por tanto, su posible influencia térmica sobre los resultados obtenidos en la condición de contorno del modelo matemático (temperatura superficial).

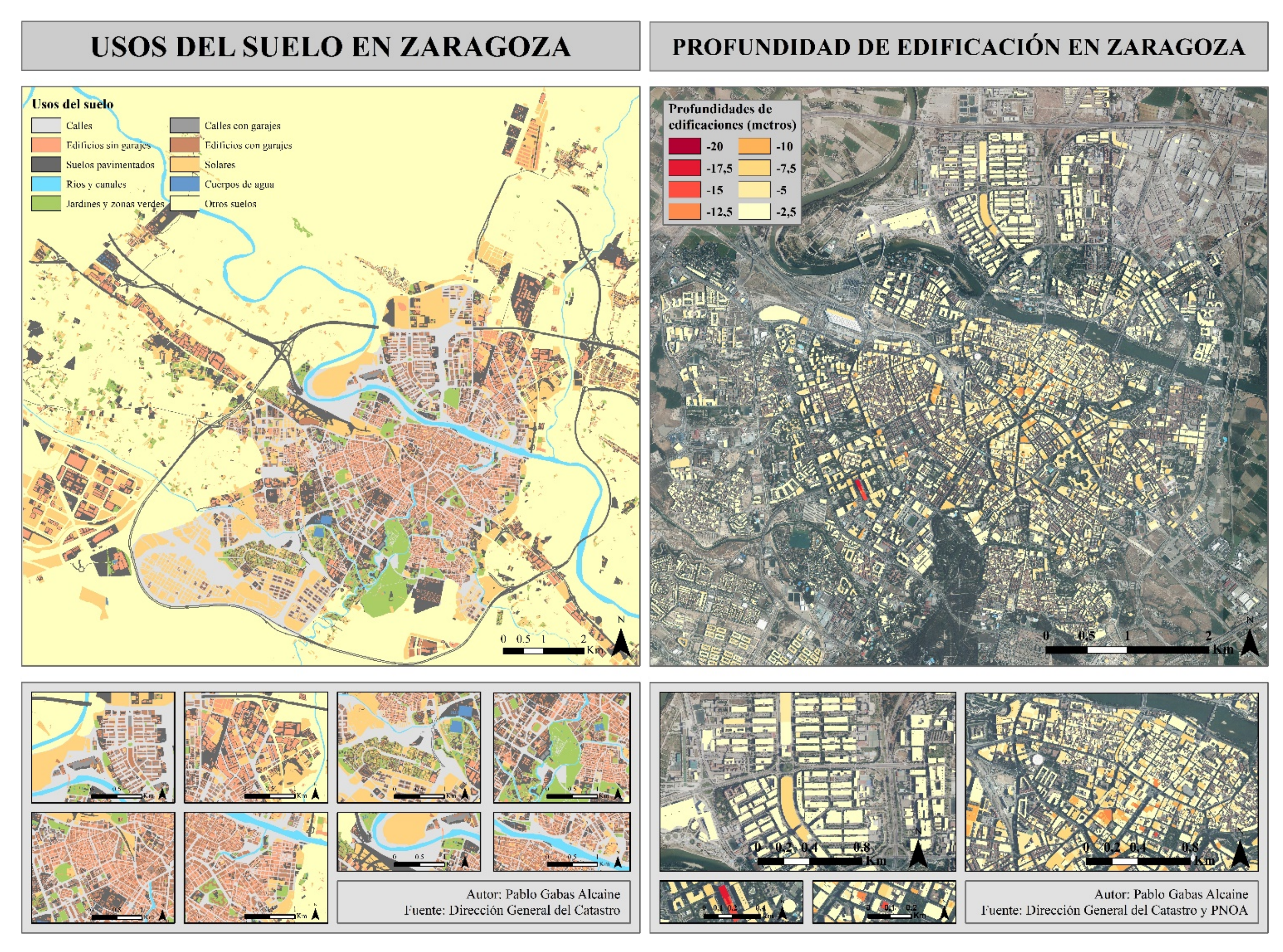


Figura 8. Mapas de usos del suelo catastrales y profundidades de edificación en Zaragoza.

De esta manera, ambas herramientas cartográficas posibilitaron extraer las temperaturas de aquellas capas de mayor interés para el IGME (Figura 9), como las calles, las calles sin garajes y las calles con garajes; siendo los formatos vectoriales, los más adecuados de cara a su implementación final.

5. CONCLUSIONES

La teledetección y los SIG constituyen sistemas eficaces de cara al conocimiento de la ciudad y sus particularidades, con gran aplicabilidad en la interpretación de fenómenos climáticos urbanos como la isla de calor. Su compleja configuración, responde a la conjunción de múltiples factores entrelazados, desde el agua y la vegetación, pasando por las características térmicas de los materiales, los factores astronómicos, los agentes climáticos y hasta la morfología urbana.

De esta manera, la isla de calor muestra variaciones espaciales en función del momento del año y registro de la imagen, muy en relación con los factores causales aludidos, determinándose cada situación como única en lo que respecta a su interpretación. A partir de su configuración y patrones térmicos resultantes, pueden identificarse y caracterizarse en total 8 comportamientos térmicos urbanos distintos.

A su vez, las fuentes catastrales constituyen una útil herramienta de cara a la obtención de información relativa a la edificabilidad y las cubiertas urbanas, posibilitando la creación de novedosas y útiles salidas cartográficas. Si bien es cierto que el procedimiento diseñado ha permitido la extracción de las temperaturas para las capas de interés del modelo de flujo subterráneo y transporte de calor construido por el IGME, también ha puesto de manifiesto, no obstante, grandes dificultades en lo que a la manipulación de la información catastral se refiere.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto "Aplicación de un modelo de transporte de

calor en aguas subterráneas para la simulación y alternativas de gestión de aprovechamientos geotérmicos en la ciudad de Zaragoza", financiado por el CN-IGME (CSIC) y la CHE. Agradecemos a Ángel Pueyo por sus aportaciones, a Nieves López, funcionaria de la Agencia de Medio Ambiente y Sostenibilidad, por su ayuda en la toma de datos climáticos y a Brunilda Palacio, funcionaria de la AEMET, por su contribución en la obtención de información de carácter meteorológico.

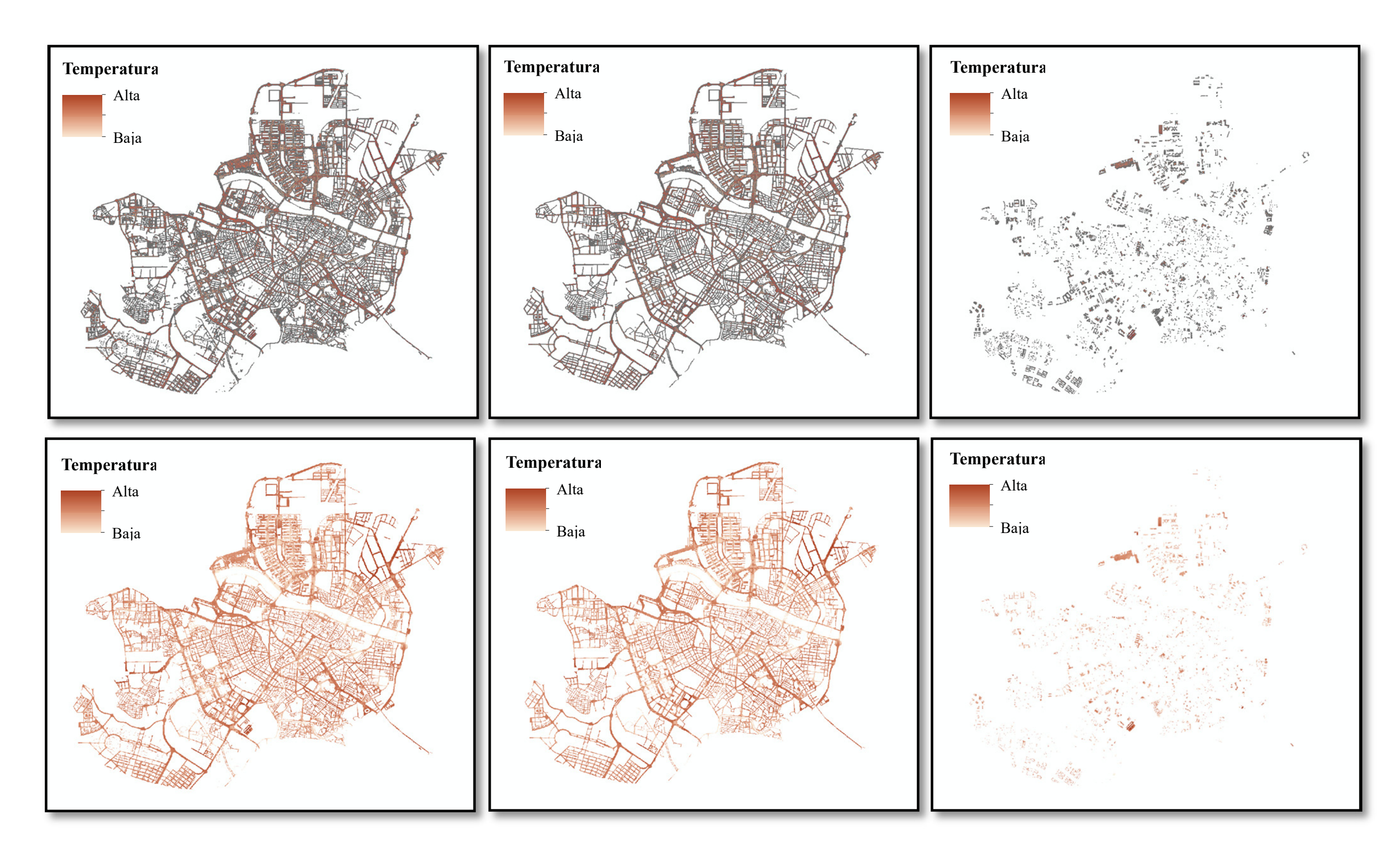


Figura 9. Gráficos de las temperaturas superficiales de agosto sobre las calles (izquierda), calles sin garajes (centro) y calles con garajes (derecha), en formatos vectoriales (gráficos superiores) y ráster (gráficos inferiores).

6. BIBLIOGRAFÍA

AEMET. Datos abiertos. http://www.aemet.es/es/datos_abiertos/AEMET_OpenData [último acceso, marzo de 2022].

Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona, Ariel.

CNIG. Centro de Descargas. http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp [último acceso, mayo de 2022].

Cuadrat, J.M., de la Riva, J., López, F., Martí, A. (1993). El medio ambiente urbano en Zaragoza. Observaciones sobre la isla de calor. *Anales Universidad Complutense* 13, 127-138. https://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/AGUC9393110127A

Cuadrat, J.M., Serrano-Notivoli, R., Barrao, S., Saz, M.A., Tejedor, E. (2022). Variabilidad temporal de la isla de calor urbana de la ciudad de Zaragoza (España). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 48, 97-110. http://doi.org/10.18172/cig.5022

Cuadrat, J.M., Vicente-Serrano, S., Saz, M.A. (2005). Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): la isla de calor y sus factores condicionantes. *Boletín de la AGE*, 40, 311-327. https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/2019

Cuadrat, J.M., Vicente-Serrano, S., Saz, M.A. (2015). Influence of different factors on relative air humidity in Zaragoza, Spain. *Frontiers in Earth Science*, 3 (10). https://doi.org/10.3389/feart.2015.00010

Curran, P.J. (1985). *Principles of remote sensing*. London, Longman.

de La Riva, J., Cuadrat, J.M., López, F., Martí A. (1997). Aplicación de las imágenes Landsat TM al estudio de la isla de calor térmica de Zaragoza. *Geographicalia,* 35, 24-36. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1997351701

Farr, G.J., Patton, A.M., Boon, D.P. James, D.R., Williams, B., Schofield, D.I. (2017). Mapping shallow urban groundwater temperatures, a case study from Cardiff, UK. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 50 (2), 187-198. http://dx.doi.org/10.1144/qjegh2016-058

Ferrer, V., Solé-Sugrañes, U. (1995). Caracterización de emisiones térmicas en áreas suburbanas mediante imágenes Thematic Mapper". *Revista de Teledetección*, (5), 1-5.

García, A. (2015). *Criterios técnicos para la gestión de recursos geotérmicos someros en acuíferos urbanos*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza.

Garrido, E., García, A., Vázquez, E., Sánchez, J.A. (2016). Geochemical impacts of groundwater heat pump systems in an urban alluvial aquifer with evaporitic bedrock. *Science of the Total Environment*, 544, 354-368. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.096

Garrido, E., Sánchez, J.A., Coloma, P. (2010). Aprovechamiento geotérmico somero del acuífero aluvial urbano de Zaragoza: primeros resultados. *GEOGACETA*, 49, 115-118.

IAEST (2021). Cifras de Población. Revisión del Padrón municipal 2021. Aragón Open Data, Instituto Aragonés de Estadística, Gobierno de Aragón. https://opendata.aragon.es/datos/catalogo/dataset/cifras-de-poblacion-revision-del-padron-municipal [último acceso, julio de 2022].

Meteociel.fr. Observations, prévisions, modèles en temps réel. http://www.meteociel.fr/observations-meteo/pression.php?region=sp [último acceso, marzo de 2022].

Sede Electrónica del Catastro. Descarga de datos y cartografía por municipio. https://www.sedecatastro.gob.es/Accesos/SECAccDescargaDatos.aspx# [último acceso, mayo de 2022].

Sistema CALIOPE. Pronósticos. http://www.bsc.es/caliope/es/pronosticos [último acceso, marzo de 2022].

Sobrino, J.A., Raissouni, N., Li, Z.L. (2001): A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. *Remote Sensing of Environment*, 75 (2), 256-266. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00171-1

USGS (2016). *Landsat 8 (l8) Data Users Handbook*. Sioux Falls, U.S. Geological Survey.

Valor, E., Caselles, V. (1996). Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas. *Remote Sensing of Environment*, 57 (3), 167-184. https://doi.org/10.1016/0034-4257(96)00039-9

Van De Griend, A.A., Owe, M. (1993). On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, (14), 1119-1131. https://doi.org/10.1080/01431169308904400



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 266-275

Cuantificación mediante TIG de los cambios en la escorrentía superficial en Sierra Bermeja (Málaga) tras el incendio de septiembre de 2021

A. Gallegos Reina[1]

[1] *Departamento de Geografía, Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, Boulevard Louis Pasteur, 29071 Málaga (España)*

a.gallegos@uma.es

RESUMEN: El incendio forestal de 2021 en Sierra Bermeja (Málaga) dejó un lamentable balance de 10.000 hectáreas calcinadas, con alto valor ecológico, y una persona fallecida. Pero más allá de esto, la pérdida de esta gran área forestal, situada junto a la aglomeración urbana de la Costa del Sol Occidental, tendrá previsiblemente otras repercusiones que no son menores, tal como es el incremento en la peligrosidad por inundación en los municipios litorales. Las laderas meridionales de la Sierra Bermeja vierten sus aguas de escorrentía en los términos municipales de Estepona y Marbella, de cuyo litoral apenas distan cinco kilómetros.

En este trabajo se realiza una cuantificación con tecnologías de la información geográfica del decremento que dicho incendio produjo en el umbral de escorrentía de los suelos en la región. Conjuntamente, se han calculado las medias de las máximas lluvias anuales en la zona, obteniendo como producto final la escorrentía neta prevista en caso de lluvias torrenciales de carácter anual. Estos valores espaciales se han comparado con la situación pre-incendio, pudiendo obtenerse una comparativa diacrónica de la escorrentía en zonas concretas y de la escorrentía total generada en ambos escenarios. Los resultados muestran incrementos de escorrentía para el conjunto de los municipios afectados del 71% con respecto a la situación pre-incendio, lo que debería ser tenido en consideración para la gestión preventiva de los municipios afectados, tantos del litoral como de la Serranía de Ronda.

Palabras-clave: incendios forestales, escorrentía, usos del suelo, Sierra Bermeja, TIG.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

En septiembre de 2021 se produjo en Sierra Bermeja, en la provincia de Málaga, uno de los peores incendios forestales sufridos en la última década en Andalucía. Las laderas meridionales de Sierra Bermeja vierten sobre la Costa del Sol, de cuyo litoral apenas dista 5 kilómetros. El área incendiada se quedó cerca de alcanzar las 10.000 hectáreas, dejando una persona fallecida y grandes pérdidas ecológicas y económicas. No obstante, la transformación de una gran área forestal próxima a la aglomeración urbana de la Costa del Sol en terreno quemado tiene otras repercusiones, tal como es el incremento en la peligrosidad por inundación en el litoral.

El objetivo principal de este trabajo es determinar, mediante tecnología SIG, la variación de la escorrentía superficial asociada al cambio de escenario, bajo condiciones medioambientales previas y posteriores al incendio, y evaluar sus efectos potenciales en los distintos términos municipales afectados.

Las consecuencias del incendio forestal de 2021 fueron muy notables desde un punto de vista biológico, por la indudable importancia ecológica de la Sierra Bermeja, que incluso alberga bosques de pinsapos. De hecho, desde 2007 existe una creciente movilización vecinal y ecologista solicitando su declaración como Parque Nacional. Pero al desastre natural del incendio en sí le seguirán en los próximos años otros de no menor importancia como la pérdida de suelo y el aumento de los caudales de avenida e inundaciones. La correlación entre incendios forestales e inundaciones en ámbitos mediterráneos ha sido ampliamente estudiada por numerosos autores, pero los trabajos se centran principalmente en las causas y características de esta relación, y no tanto en su cuantificación. Algunos trabajos aluden a las razones por las que en muchas zonas mediterráneas esté aumentando durante las últimas décadas el número de incendios y su intensidad (Alcasena et al., 2019: 573; Bodi et al., 2012; Pausas y Fernández, 2012; Seijo y Gray, 2012; Naveh, 1991). Fundamentalmente se debe al éxodo rural, la falta de gestión forestal y las condiciones propias del clima

mediterráneo. De estas últimas destaca, sin duda, la coincidencia de la época cálida con la época seca, lo que deja la vegetación muy expuesta a la combustión. Es igualmente reseñable el desarrollo urbanístico y territorial del litoral mediterráneo, especialmente en zonas de interfaz urbano-forestal (Vallejo et al., 2009; Pausas et al., 2008).

El cambio climático está jugando también un papel especialmente relevante, por sus implicaciones ambientales en relación con la alteración creciente de las condiciones térmicas y pluviométricas, materializada sobre todo en un incremento de la temperatura, de la duración e intensidad de las sequías y de la torrencialidad las lluvias (MEDECC, 2019; Cortés et al., 2019; Camarasa, 2020; Olcina, 2020; Blöschl et al., 2020; Ollero et al., 2021; Serrano-Notivoli et al., 2022). Kampf et al. (2018) y Martínez-Salvador et al. (2021) resaltan también la importancia de conocer los umbrales necesarios para generar los flujos de avenida, por su aplicabilidad en modelizaciones hidrológicas predictivas y en la determinación y cartografía de áreas con peligro de inundabilidad.

Otros autores han analizado la relación directa que existe entre ambos tipos de peligrosidad, su correlación y secuencialidad, abordando la hidrofobicidad que causan los incendios forestales y sus distintas consecuencias, tanto en la generación de escorrentía como en la pérdida y el arrastrede suelos (Francos et al., 2016; Ferreira et al., 2015; Shakesby, 2011; Bodi, 2012; Martin y Moody, 2001; Osborn et al. 1964).

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

Sierra Bermeja se localiza en la provincia de Málaga (España), en las Alpujárrides occidentales, en la Zona Interna de las Cordilleras Béticas (Figura 1). Se individualiza claramente dentro de estas por tratarse de un afloramiento peridotítico, procedente de las zonas profundas del interior de la Tierra, que intruyen en la corteza y ascienden tectónicamente hasta la superficie (Serrano y Guerra, 2004). Estos afloramientos representan uno de los conjuntos de rocas ígneas ultrabásicas de mayor extensión a escala mundial, y da el característico color rojizo a la sierra. La toxicidad del substrato ha limitado la existencia de zonas de cultivo o núcleos de población, encontrándose en su mayor parte cubierto por formaciones arboladas densas (coníferas) y matorral disperso con pastizal. Al pie de los relieves escarpados de la sierra, hacía el sur, las pendientes se suavizan a media ladera, en los materiales del Maláguide, y más aún en la proximidad de la costa, en el *flysch* del Campo de Gibraltar. Su peculiaridad geológica da lugar a un buen número de endemismos vegetales, únicamente comparables en número en Andalucía con el Parque Nacional de Sierra Nevada, y da lugar igualmente a la diferenciación de un sector biogeográfico propio (sector Bermejense). Dentro de esta riqueza florística destaca el pinsapar de Los Reales, el único del planeta sobre peridotitas, que llegó a ser afectado parcialmente por el incendio. También se pueden encontrar, no obstante, ejemplares de pino negral, alcornoques, quejigos, encinas, coscojas y rebollos.

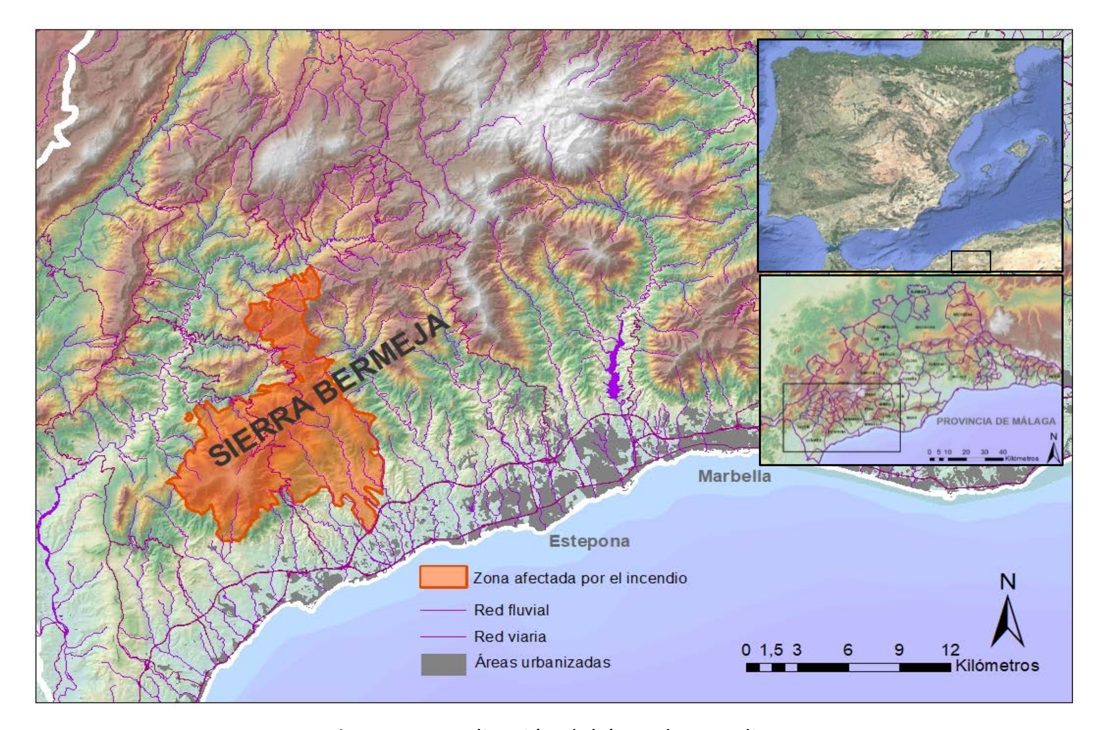


Figura 1. Localización del área de estudio.

2.2 Material y método

Para la obtención de la escorrentía neta se ha trabajado con imágenes ráster, en celdas de 10 metros/píxel. Para cada celda se ha calculado por un lado la máxima lluvia diaria anual esperable en cada celda, y por otro lado la capacidad de infiltración antes y después del incendio en esa misma celda. Conociendo el umbral a partir del cual el suelo genera escorrentía y la precipitación estimada en un evento tormentoso estadístico, se ha estimado la escorrentía generada. Y esta escorrentía es comparada antes y después del incendio de 2021.

En una primera fase se definió el perímetro del incendio, digitalizando la información específica ofrecida por Agrón (https://nomo.users.earthengine.app/view/burnareseverity), mediante la aplicación del índice NBR (*Normalized Burn Ratio*) a imágenes de satélite 'Sentinel 2', previas y posteriores al suceso. Este índice permite identificar áreas quemadas a partir de una fórmula, que combina el uso de imágenes de infrarrojo cercano (NIR) e de infrarrojo de onda corta (SWIR). La diferencia entre las respuestas espectrales de la vegetación saludable y las áreas quemadas alcanzan su pico en dichas regiones NIR y SWIR del espectro (Keeley, 2009).

La escorrentía neta se ha obtenido considerando una precipitación de carácter torrencial obtenida de la media anual de la máxima lluvia diaria y la capacidad de infiltración del suelo en ese mismo punto. Se ha calculado este valor usando cartografía ráster, con un tamaño de celda de 10 x 10 metros, lo que permite obtener tanto un mapa continuo de la escorrentía, como unos valores estadísticos medios y totales para la zona en cuestión, ya sea el propio perímetro afectado por el incendio, los municipios de su entorno u otras áreas concretas, como cuencas fluviales. Así:

Escorrentía neta en cada celda = media anual de la máxima lluvia diaria en cada celda – capacidad de infiltración en cada celda

El valor de precipitación máxima diaria media anual (pmdm) se ha obtenido a partir de la información recopilada por la publicación 'Máximas lluvias diarias en la España peninsular' (Ministerio de fomento, 1999) para las estaciones meteorológicas de la mitad occidental de la provincia de Málaga con series de datos superiores a 20 años (Figura 2). Vendría a corresponderse con el día de mayor pluviosidad estadística del año, considerando el mismo periodo de 24 horas que se usa para realizar los análisis hidrológicos en estudios de inundabilidad. Los datos se han interpolado mediante el método de *krigeado*, que pondera los valores medidos circundantes para calcular la predicción de ubicaciones sin medición, estimando con ello la variación espacial continua que se presupone en el comportamiento de las precipitaciones (Gallegos, 2013).

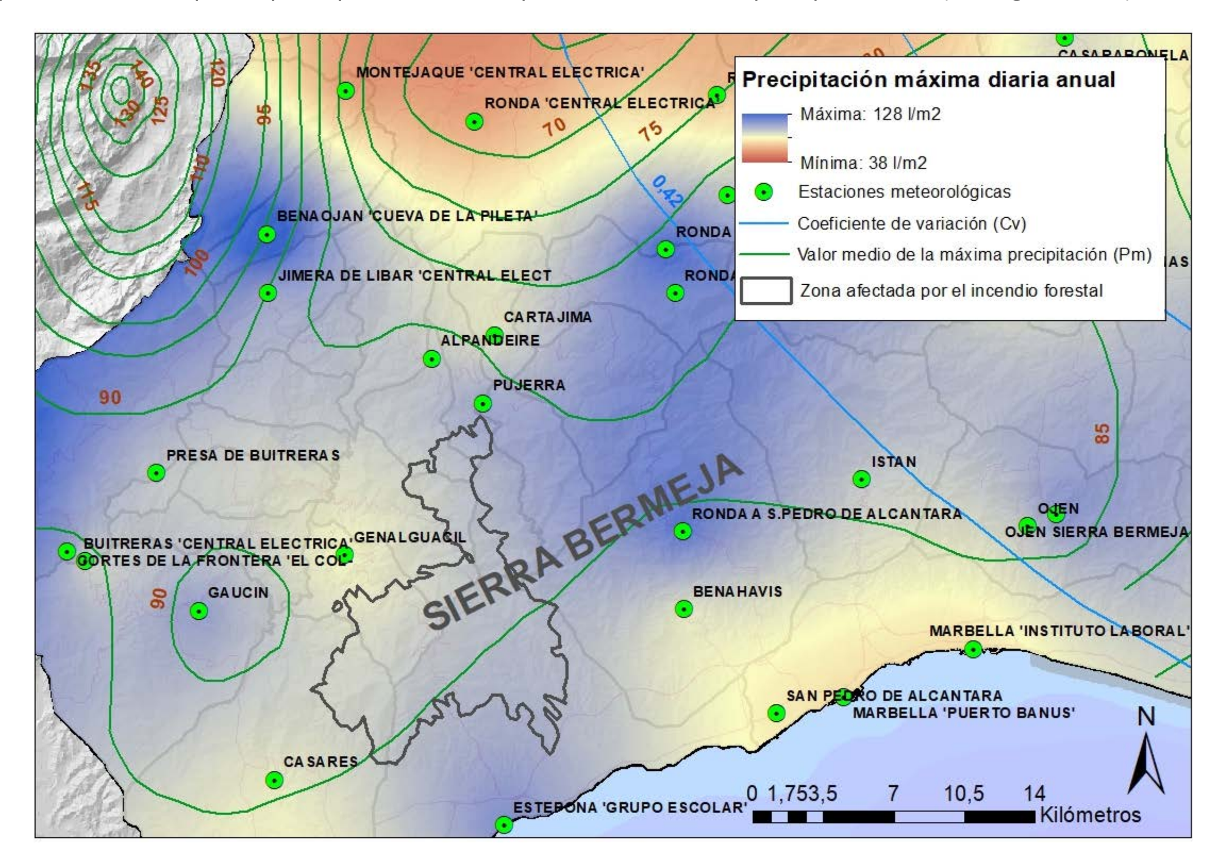


Figura 2. Media anual de la máxima precipitación diaria en la zona de trabajo.

Por su parte, los mapas de isolíneas del valor medio de la máxima precipitación diaria anual y del coeficiente de variación (Cv) se ha obtenido mediante una interpolación espacial en una malla por el método del inverso de la distancia al cuadrado. Los datos empleados para la interpolación fueron las estaciones pluviométricas representadas en la Figura 2.

La capacidad de infiltración se ha obtenido mediante el umbral de escorrentía (P_0), usando el método del número de curva del *Soil Conservation Service* (USSCS, 1972). Este, modificado y adaptado para el caso español por Témez (1991), es ampliamente utilizado por la facilidad para estimar sus parámetros a partir de criterios fácilmente evaluables, como la pendiente, los usos del suelo, sus características hidrológicas o una clasificación basada en el espesor, textura y drenaje del suelo, todas ellas propiedades extraíbles de caracterizaciones edáficas y litológicas (Espín Sánchez et al., 2017; Gallegos y Perles, 2019). Su aplicación en España está regulada por la Instrucción 5.2-IC de drenaje superficial, del Ministerio de Fomento (2017). El mapa de cubierta vegetal y usos del suelo ha sido recalculado para la situaciones pre y post-incendio con el fin de obtener sendos mapas diacrónicos del umbral de escorrentía. Las adaptaciones de los usos del suelo y la caracterización litológica a los valores de P_0 recogidos en las tablas de la citada instrucción se han realizado atendiendo a las tablas propuestas por la Agencia Catalana del Agua, que realiza una correlación de códigos utilizados en la cartografía de usos de suelo editada por el *Institut Cartogràfic y Geològic de Catalunya* (Agència Catalana de l'Aigua, 2003). Debe tenerse en cuenta, no obstante, que, al utilizarse valores de pmdm, ha sido imposible aplicar un factor de corrección según el grado de humedad previa del suelo, que, sin duda, habría mejorado los resultados obtenidos.

Finalmente, a partir de la precipitación máxima diaria media anual (pmdm) y del umbral de escorrentía (P_0) se obtiene la lluvia neta productora de escorrentía (en l/m^2) para cada celda. La cartografía resultante muestra la distribución espacial de las principales zonas que contribuyen a la generación de flujos de avenida y en qué medida lo hacen bajo las condiciones de uso del suelo de los escenarios pre y post-incendio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El incendio afectó a los municipios de Genalguacil (46,6% de su término municipal), Jubrique (32,7%), Estepona (32,4%), Juzcar (22%), Faraján (16,8%) y Casares (8,5%) (Figura 3). En esta zona de la provincia de Málaga, las precipitaciones alcanzan valores máximos medios más elevados que el promedio provincial. Así, para el conjunto de municipios afectados, la media anual de las máximas lluvias diarias es de 82 l/m^2, frente a los 67 l/m^2 del conjunto provincial. El municipio con mayores valores de pmdm es Juzcar, con 86 l/m^2, y el de menor pmdm Casares, con 77 l/m^2.

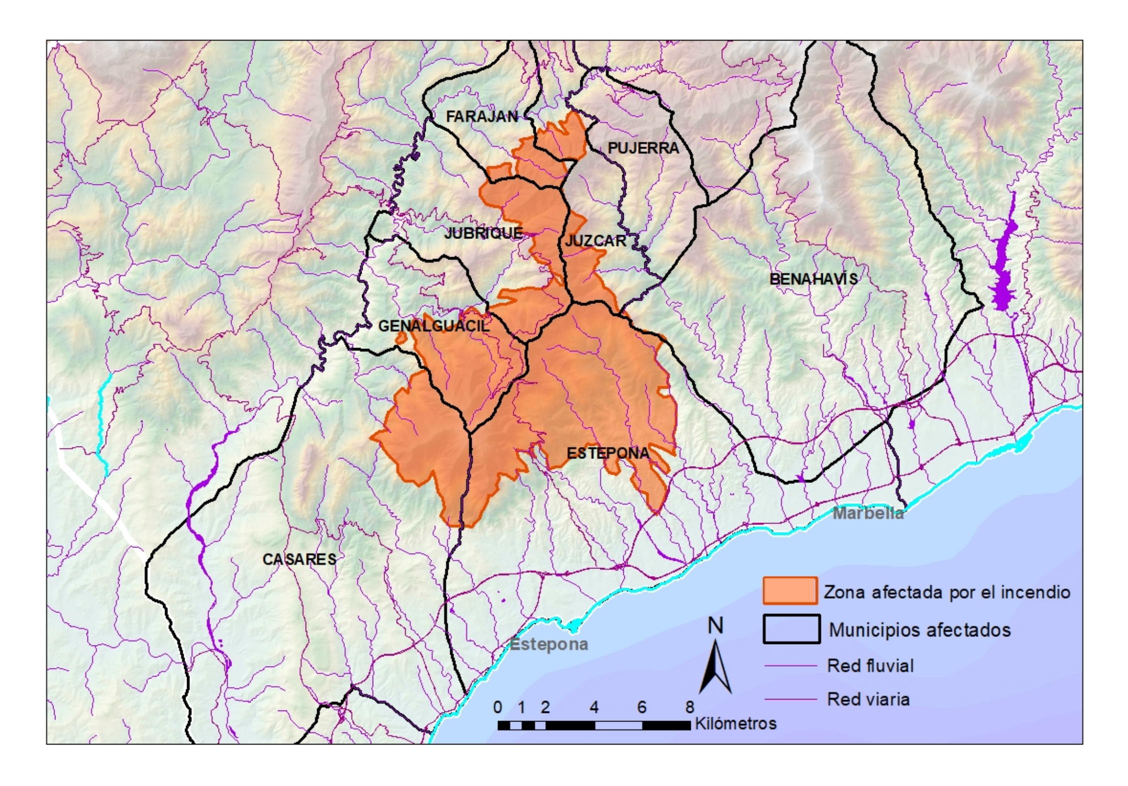


Figura 3. Términos municipales afectados por el incendio.

Frente a lo anterior, la tipología y densidad vegetal de la zona permite un alto grado de infiltración, con umbrales de escorrentía que oscilan entre los 76 l/m^2 de Estepona y los 96 l/m^2 de Faraján, con un valor medio para el conjunto de municipios afectados de 83 l/m^2 (Tabla 1 y Figura 4). Tras el incendio, la "protección frente a la generación de escorrentía" (umbral crítico de escorrentía superficial) se ha visto menguada en estos municipios en 22 l/m^2, lo que supone una reducción de la capacidad de infiltración del 27%.

Tabla 1. Resultados estadísticos del umbral de escorrentía medio antes y después del incendio.

Ámbito espacial	*Umbral de escorrentía medio (P_0) (l/m^2)*		*Disminución capacidad de infiltración (l/m^2)*	*% de la capacidad de infiltración con respecto a la situación pre-incendio*
	Pre-incendio	*Post-incendio*		
Provincia de Málaga	70,5	69,2	1,3	98,1 %
Comarca Costa del Sol Occidental	65,8	58,8	7	89,3 %
Comarca Serranía de Ronda	90,3	87,3	3	96,6 %
Municipios afectados	82,7	60,61	22,1	73,3 %
Casares	83,9	64,4	19,5	76,7 %
Estepona	75,8	40,2	35,5	53,0 %
Faraján	96	82,5	13,5	85,9 %
Genalguacil	87,5	40,1	47,3	45,8 %
Jubrique	85,60	52,10	33,60	60,8 %
Júzcar	89,20	71,00	18,30	79,5 %

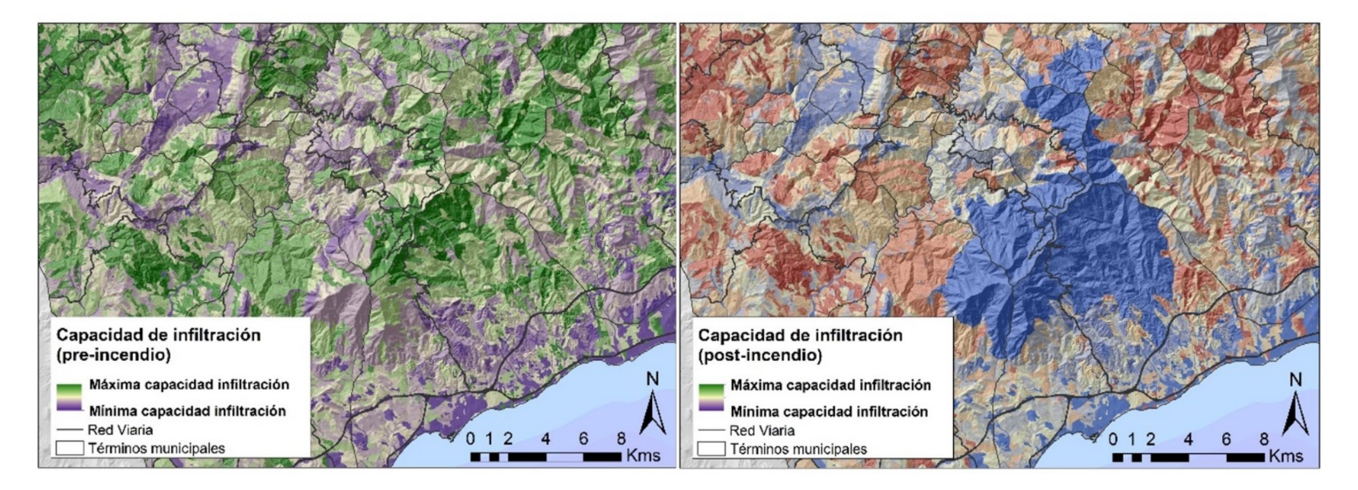


Figura 4. Capacidad de infiltración en los escenarios pre y post-incendio.

Más expresivo resulta calcular la escorrentía estimada en cada uno de los ámbitos espaciales considerados, teniendo en cuenta la máxima precipitación esperable en cada celda y el coeficiente de escorrentía en ese mismo punto (Tabla 2 y Figura 5). Transformado esto en estadísticas zonales para los distintos ámbitos analizados, se observa que la escorrentía media en el conjunto de municipios afectados por el incendio aumenta de 18 a 34 l/m^2. Respecto al total de escorrentía esperable para un evento tormentoso con una precipitación equivalente a la máxima lluvia diaria del año, el incremento es muy notable, llegando a escurrir un 171% de precipitación más de lo que lo haría en condiciones normales, previas al incendio. Este incremento es especialmente significativo en el municipio de Genalguacil, donde la escorrentía casi se triplica.

Tabla 2. Resultados estadísticos de la escorrentía neta y escorrentía total que cabe esperar para un evento tormentoso equivalente a la media anual de la máxima lluvia diaria.

Ámbito Espacial	*Escorrentía neta media (l/m²)*			*Total de escorrentía (m³)*			*% incremento escorrentía neta*
	Antes	*Después*	*Incremento*	*Antes*	*Después*	*Incremento*	
Provincia de Málaga	15.13	16.41	1.28	44.108	47.815	3.708	8,4
Comarca Costa del Sol Occidental	28.51	33.99	5.48	9.105	10.874	1.769	19,4
Comarca Serranía de Ronda	12.42	14.94	2.53	6.216	7.469	1.254	20,2
Municipios afectados	18.39	33.98	15.59	3.269	5.606	2.336	71,5
Casares	23.53	23.88	0.35	1.067	1.083	16	1,5
Estepona	27.70	51.39	23.70	1.512	2.810	1.298	85,9
Faraján	9.89	21.36	11.47	81	176	94	116,0
Genalguacil	15.87	44.63	28.76	200	562	362	181,2
Jubrique	14.11	37.73	23.61	220	589	369	167,3
Júzcar	14.19	28.94	14.75	189	386	197	104,0
Área del incendio	12.47	78.04	65.57	481	3.013	2.531	525,9

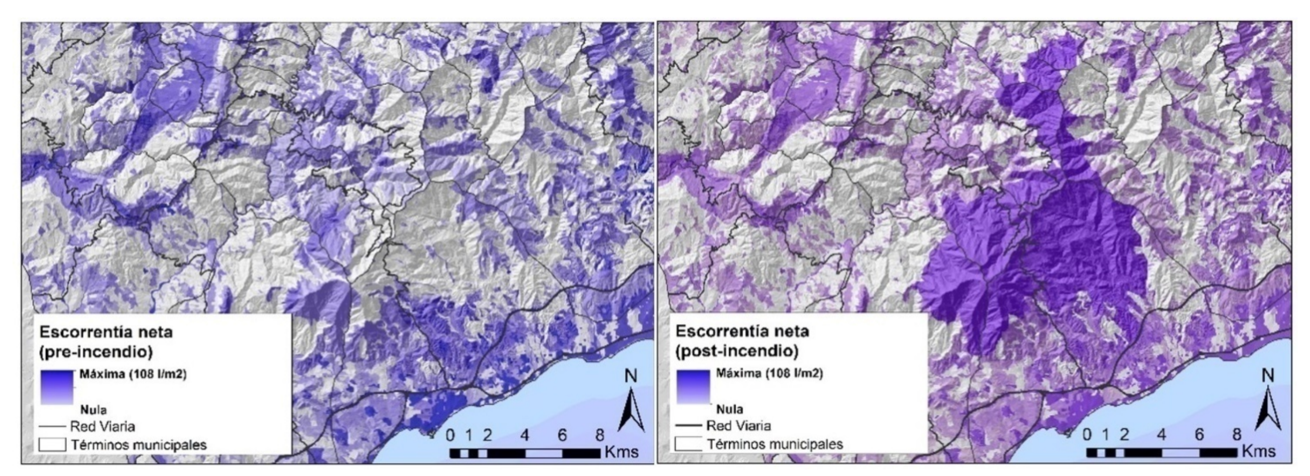


Figura 5. Escorrentía neta para un evento tormentoso con periodo de retorno de 1 año en los escenarios pre y post-incendio.

Cabe tener presente que en esta modelización se está trabajando con un supuesto de máximos que no necesariamente debe cumplirse en la realidad. Así, para la estimación del umbral de escorrentía se han utilizado los criterios indicados en la Orden FOM/273/2016, por la que se aprueba la Instrucción de Carreteras. Esta norma establece un valor de escorrentía inicial para zonas quemadas (código 33400) que oscila entre 4 y 15 l/m2 (Ministerio de Fomento, 2017). No obstante, se ha aplicado un criterio de homogeneidad para toda el área incendiada, si bien la afección del incendio a la vegetación es irregular, pudiendo existir zonas en las que este ha avanzado únicamente por las copas de los árboles, y los umbrales iniciales de escorrentía, por tanto, podrían ser matizados. De igual modo, se ha comprobado que las comunidades vegetales de los ecosistemas mediterráneos tienen una alta resiliencia a los incendios forestales (Bodi et al., 2012; Lloret y Zedler, 2009), por lo que se produce una relativamente rápida transición entre lo que deberíamos considerar "zona quemada" y las subsiguientes coberturas del terreno. Debe considerarse, por tanto, que a pesar de ser este un método teórico, puede servir de base,

como aproximación, para conocer mejor la respuesta general de los suelos quemados en la escorrentía de la zona afectada.

4. CONCLUSIONES

Este estudio contribuye a conocer mejor cómo podría haber afectado el incendio de septiembre de 2021 a la magnitud de los flujos de avenida aguas abajo. Además, permite comparar dicha escorrentía antes y después del incendio, lo que nos sirve como aproximación teórica sobre la problemática en escenarios similares de regiones mediterráneas. Estimar la escorrentía potencial previsible bajo ambos escenarios ambientales permite orientar las acciones que las administraciones responsables pueden y deben llevar a cabo mediante las herramientas de gestión y ordenación territorial. Es, asimismo, un trabajo que puede ser replicado en distintos casos, gracias al uso de materiales y métodos fácilmente accesibles y estandarizados.

Las masas boscosas de Sierra Bermeja hasta el pasado año constituían una excelente garantía contra las inundaciones en la Costa del Sol Occidental (Gallegos, 2018). Su alto umbral de escorrentía permitía atenuar los riesgos de las lluvias torrenciales. En los próximos años, y mientras el bosque, sotobosque y suelos no vuelvan a recuperar sus características previas al incendio, se debe estar prevenido ante futuros episodios torrenciales, y la información aquí aportada debiera ser de interés para ello.

El actual Cambio Global, que está incrementando de forma sustancial la peligrosidad de incendios y de inundaciones en medios mediterráneos semiáridos, como este, requiere promover y potenciar la investigación científico-técnica en este sentido, con la aplicación de modelos de predicción hidrológica que impliquen el mínimo nivel de incertidumbre, y así poder diseñar estrategias de adaptación y resiliencia adecuadas. De hecho, los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRIs) incluyen entre sus medidas de acción la “elaboración de estudios de mejora del conocimiento sobre la gestión del riesgo de inundación”. Faltaría ahora realizar un estudio similar en relación a las pérdidas potenciales de suelo derivadas del citado incendio en esta zona. Este es un medio ambientalmente frágil, donde la regeneración de los suelos es un proceso bastante más lento e incierto que la propia recuperación de la masa forestal.

5. BIBLIOGRAFÍA

Agència catalana de l'aigua (2003): *Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local*. Barcelona: Agència Catalana de l'Aigua.

Alcasena, F. J.; Vega, C.; Ager, A.; Salis, M.; Nauslar, N. J.; Mendizabal, F. J.; Castell, R. (2019). Metodología de evaluación del riesgo de incendios forestales y priorización de tratamientos multifuncionales en paisajes mediterráneos. *Cuadernos de investigación geográfica*, 45-2, 571-600. http://doi.org/10.18172/cig.3716

Blöschl, G. et al. (2020): Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years. *Nature*, 583, 560-566. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2478-3

Bodí, M., Cerdá, A., Mataix, J., & Doerr, S. (2012). Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: revisión bibliográfica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos españoles*. 58, 33-55.

Camarasa Belmonte, A. M. (2020): El riesgo de inundación en ramblas y barrancos mediterráneos. En *Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes* (pp. 325-331). Alicante: Ed. Universitat d'Alacant.

Cortés, M. et al. (2019): Changes in flood damage with global warming in the east coast of Spain. *Natural Hazards Earth*, 19, 2855-2877. https://doi.org/10.5194/nhess-2019-253

Ferreira, A.J., Prats Alegre, S., Alves Coelho, C.O., Shakesby, R.A., Páscoa, F.M., Ferreira, C.S., Keizer, J.J. & Ritsema, C. (2015). Strategies to prevent forest fires and techniques to reverse degradation processes in burned areas. *Catena*, 128, 224–237.

Francos, M., Pereira, P., Alcañiz, M., Mataix, J., Arcenegui, V. & Úbeda, X. (2016). Efecto de una lluvia torrencial post-incendio en la repelencia al agua y la velocidad de infiltración de un suelo en un ambiente mediterráneo (NE España). En Durán, J.J., Montes, M., Robador, A. Y Salazar, A. (Eds.) *Comprendiendo el relieve: del pasado al future* (81-88). Málaga: Instituto Geológico y Minero de España.

Gallegos Reina, A. & Perles Roselló, M.J. (2019). Relaciones entre los cambios en los usos del suelo y el incremento de los riesgos de inundabilidad y erosión: análisis diacrónico en la provincia de Málaga (1957-2007). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 81, 1–38. http://dx.doi.org/10.21138/bage.2740

Gallegos Reina, A. (2013). Cuantificación y distribución cartográfica de la generación de escorrentía y sedimentos en la provincia de Málaga. *Baética*, 35, 57-74. Retrieved from http://www.revistas.uma.es/index.php/baetica/article/view/57/26

Gallegos Reina, A. (2018). *Caracterización y análisis de los riesgos naturales en el planeamiento urbanístico del litoral mediterráneo español*. Málaga: UMA Editorial.

Kampf, S. K., Faulconer, J., Shaw, J. R., Lefsky, M. Wagenbrenner, J. W., & Cooper, D. J. (2018): Rainfall Thresholds for Flow Generation in Desert Ephemeral Streams, *Water Resour. Res.*, 54, 9935–9950, https://doi.org/10.1029/2018WR023714

Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116–126.

Lloret, F. & Zedler, P. H. (2009): The effect of forest fire on vegetation», en *Fire effects on Soils and Restoration Strategies* (Cerdà, A. y Robichaud, P. R., coord.). Enfield, Edit. Science Publishers, 257-295.

Martin, D.A. AND Moody J.A. (2001). Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds. *Hydrological Processes*, 15, 2893-2903.

MEDECC (2019): Risks associated to climate and environmental changes in the Mediterranean region. Preliminary assessment by the MedECC Network Science-policy interface. https://www.medecc.org/medecc-booklet-isk-associated-to-climate-and-environmental-changesin-the-mediterranean-region/

Ministerio de Fomento (1999). Máximas lluvias diarias en la España peninsular. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transporte. Dirección general de carreteras.

Ministerio de Fomento (2017): Orden FOM/185/2017, de 10 de febrero, por la que modifican la Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2-IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras y la Orden FOM/534/2014, de 20 de marzo, por la que se aprueba la norma 8.1-IC señalización vertical de la Instrucción de Carreteras. BOE núm. 55 de 06 de Marzo de 2017.

Naveh, Z. (1991). The role of fire in Mediterranean vegetation. *Botanika Chronika*, 10, 386-405.

Olcina Cantos, J. (2020): Clima, cambio climático y riesgos climáticos en el litoral mediterráneo. Oportunidades para la Geografía. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 66/1, 159-182. https://doi.org/10.5565/rev/dag.629

Osborn, J.R., Pelishek, R.E., Krammes, J.S., Letey, J. (1964). Soil wettability as a factor in erodibility. *Soil Science Society of America Proccedings*, 28, 294–295.

Pausas, J.G., Fernández Muñoz, S. (2012). Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime. *Climatic Change*, 110, 215-226. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0060-6

Seijo, F., Gray, R. (2012). Pre-Industrial Anthropogenic Fire Regimes in Transition: The Case of Spain and its Implications for Fire Governance in Mediterranean Type Biomes. *Human Ecology Review*, 19, 58-69.

Serrano Notivoli, R., Martínez Salvador, A., García Lorenzo, R, Espín Sánchez, D. & Conesa García, C. (2022). Rainfall–runoff relationships at event scale in western Mediterranean ephemeral streams. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 26, 1243–1260. https://doi.org/10.5194/hess-26-1243

Serrano, F. & Guerra, A. (2004). *Geología de la provincia de Málaga*. Málaga: Ed. CEDMA.

Shakesby, R.A. (2011). Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 105, 71-100. http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.001

Témez, J.R. (1991): Extended and improved Rational Method. Version of the Highways Administration of Spain. *Proc. Proc. XXIV AIHS Congress*, vol. A, 33-40.

USSCS (1972): *National Engineering Handbook*. Sec 4, sup. A, Hydrology. Soil Conservation Service.

Vallejo, R.; Serrasoles, J.; Alloza, J. A.; Baeza, M.; Bladé, C.; Chirino, E.; Duguy, B.; Fuentes, D.; Pausas, J.G.; Valdecantos, A.; Vilagrosa, A. (2009). Long-term restoration strategies and techniques, en Cerdá, A. Y Robichaud, P. R., (coord.) *Fire effects on Soils and Restoration Strategies*, Enfield: Edit. Science Publishers, 373-398.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 276-285

Modelos de Distribución de Especie de *Telmatogeton magellanicus* (Diptera: Chironomidae) como herramienta para detectar los avances del cambio climático en la Reserva de Biosfera de Cabo de Hornos, ecorregión subantártica de Magallanes

M. Gañán[1,2,3], T. Contador[1,2,3], J. Rendoll Cárcamo[1,2,3], F. Simões[4,5], N. Bonada[6], P. Convey[2,3,5]

[1] *Wankara Subantarctic and Antarctic Freshwater Ecosystems Laboratory, Universidad de Magallanes, Puerto Williams, Chile.*
[2] *Millennium Institute Biodiversity of Antarctic and Subantarctic Ecosystems (BASE), Santiago, Chile.*
[3] *Cape Horn International Center (CHIC), Puerto Williams, Chile.*
[4] *Department of Zoology, Museum of Zoology, University of Cambridge, CB2 3EJ, UK.*
[5] *British Antarctic Survey, NERC, Cambridge, CB3 0ET, UK.*
[6] *FEHM-Lab (Freshwater Ecology, Hydrology and Management), Universidad de Barcelona, España.*

melysa_gm@yahoo.es, tamara.contador@umag.cl, javier.rendoll@gmail.com, flsimoes28@gmail.com, bonada@ub.edu, pcon@bas.ac.uk

RESUMEN: Los impactos del cambio climático están afectando fuertemente los ecosistemas, comunidades y especies terrestres y acuáticas de las regiones polares y subpolares. La ecorregión subantártica de Magallanes, debido a sus características y condiciones geográficas, representa un laboratorio natural para investigar respuestas de la biota terrestre y acuática al cambio climático. En este estudio, investigamos los cambios en los patrones de distribución del díptero subantártico *Telmatogeton magellanicus* (Chironomidae), nativo de los hábitats intermareales del sur de la ecorregión subantártica de Magallanes, en la Reserva de la Biosfera Cabo de Hornos, y cómo esta especie podría ser un buen centinela de cambio climático. A través del modelado de nicho ecológico o modelos de distribución de especies, modelamos la distribución actual y proyectada al futuro de *T. magellanicus* bajo dos escenarios de cambio climático predichos por el IPCC (SSP2-4.5 y SSP5-8.5). Los primeros resultados indican que para el escenario más catastrófico (SSP5-8.5) las consecuencias ecológicas del cambio climático no favorecerían a *T. magellanicus*, reduciendo su hábitat idóneo casi por completo, lo que podría conducir a la extinción local de varias poblaciones.

Palabras-clave: modelado de nicho ecológico, ecorregión subantártica de Magallanes, *Telmatogeton magellanicus*, cambio climático.

1. INTRODUCCIÓN

El sexto informe de evaluación del IPCC (2022) y diversas investigaciones (Convey et al., 2018; Lee et al., 2017; Elster, 2020) indican que los impactos del cambio climático están afectando fuertemente los ecosistemas, comunidades y poblaciones de especies terrestres y acuáticas de las regiones polares y subpolares. Estas regiones desempeñan un papel fundamental en la regulación del sistema climático mundial. La ecorregión subantártica de Magallanes se extiende desde el Golfo de Penas (47°S) hasta el Cabo de Hornos (56°S) y contempla los bosques y humedales más australes del planeta. Se caracteriza por un terreno montañoso de baja altitud y con gradientes ambientales muy marcados, es un lugar que ha experimentado un bajo impacto antropogénico siendo un laboratorio natural ideal para evaluar respuestas de la biota terrestre y dulceacuícola al cambio climático global (Rozzi et al. 2012, Contador et al., 2014; Rendoll et al., 2019). En este sentido, los insectos resultan ser organismos modelo muy convenientes para evaluar las consecuencias ecológicas del cambio climático, ya que son muy sensibles a los cambios térmicos de su entorno, pudiendo afectar sus patrones fenológicos y de distribución. En este contexto, *Telmatogeton magellanicus* (Jacobs 1900) es un díptero quironómido nativo que habita la zona intermareal del sur de la ecorregión subantártica de Magallanes. Presenta una distribución restringida a hábitats de playas de rocas grandes y algas filamentosas como *Bostrychia* spp. y *Ulva* spp. principalmente, pero también donde hay una

combinación de estas algas con *Porphyra* spp., grava, arena y bivalvos (Simões et al., 2020). Poco se conoce sobre sus patrones de distribución y como otras especies de insectos subantárticos, es importante comprender mejor su biología y distribución dada su potencial vulnerabilidad a los impactos del cambio climático.

Los modelos de nicho ecológico (ENM) o modelos de distribución de especies (SDM) son modelos matemáticos basados en diferentes algoritmos que intentan aproximar el nicho ecológico de una especie integrando información espacial, climática, topográfica, satelital, entre otras (Peterson et al., 2011; Barbosa et al., 2012). Este modelo matemático puede ser transformado en un modelo cartográfico, como por ejemplo un mapa, que represente la idoneidad de hábitat o la probabilidad de ocurrencia, dependiendo del tipo de ocurrencias que tengamos y del tipo de algoritmo que utilicemos. Los ENM se usan cada vez más para evaluar la influencia del cambio climático en los patrones de distribución de las especies (Wang et al., 2018) e identificar escenarios de pérdida de hábitat (Angelieri et al., 2016).

En este estudio, nuestro objetivo es a partir de tecnologías de la información geográfica, como son los modelos de distribución de especie o de nicho ecológico, conocer los patrones de distribución actuales de *T. magellanicus* y posibles cambios en estos patrones de distribución bajo escenarios de cambio climático, y así evaluar su potencial como especie centinela de cambio climático.

2. Metodología

2.1. Área de Estudio

Para modelar el nicho ecológico de una especie y evitar generar resultados erróneos afectando las métricas del rendimiento del modelo (como por ejemplo la capacidad de discriminación y de calibración) es muy importante definir bien el área de estudio. Siguiendo a Sillero et al., (2021), el área de estudio se redujo a un buffer alrededor de los registros de presencia de la especie (Báez et al., 2020), coincidiendo esta área con el sur de una ecorregión, lo cual también se recomienda como una buena opción a la hora de escoger el *background* o área de modelado (Sillero, 2010). El área de estudio corresponde entonces al sur de la ecorregión subantártica de Magallanes, entre la latitud 52°S y 56°S, donde se encuentra la Reserva de Biosfera de Cabo de Hornos (RBCH), la reserva más grande de Chile y la más austral del mundo, que alberga tres parques nacionales: Parque Nacional Cabo de Hornos, Parque Nacional Yendegaia y Parque Nacional Alberto de Agostini (Figura 1).

2.2. Preparación de los datos

2.1.1. Recopilación y revisión de las ocurrencias

Durante el año 2021, se realizó la recopilación y revisión de la información sobre los diferentes muestreos de campo realizados en el área de estudio donde se había registrado la presencia de *T. magellanicus*. Se recopilaron un total de 27 presencias correspondientes a muestreos realizados por: Felipe Simões et al., (2020) durante el año 2016 al 2018 en la costa norte de la isla Navarino (en la RBCH); Tamara Contador durante el año 2018 en isla Gonzalo (Archipiélago Diego Ramírez, RBCH) y en isla Hornos (Parque Nacional Cabo de Hornos, RBCH), y en el año 2019 en Almanza (Tierra del Fuego); Sebastián Rosenfeld el año 2018 en el estrecho de Magallanes (Punta Arenas); y Peter Convey el año 2020 en las islas Falckand o Malvinas (Figura 1).

No fue necesario ningún filtrado de registros pues no se generaron conglomerados de puntos, ni se eliminó ninguno por autocorrelación pues estaban separados a una distancia mayor a la resolución espacial de la capa climática (aprox. 1 km). Finalmente, se perdieron 10 puntos de presencia por falta de datos en las capas climáticas, éstos no pudieron moverse a pixeles anexos como se sugiere en Sillero et al. (2021) pues los valores eran bastante diferentes.

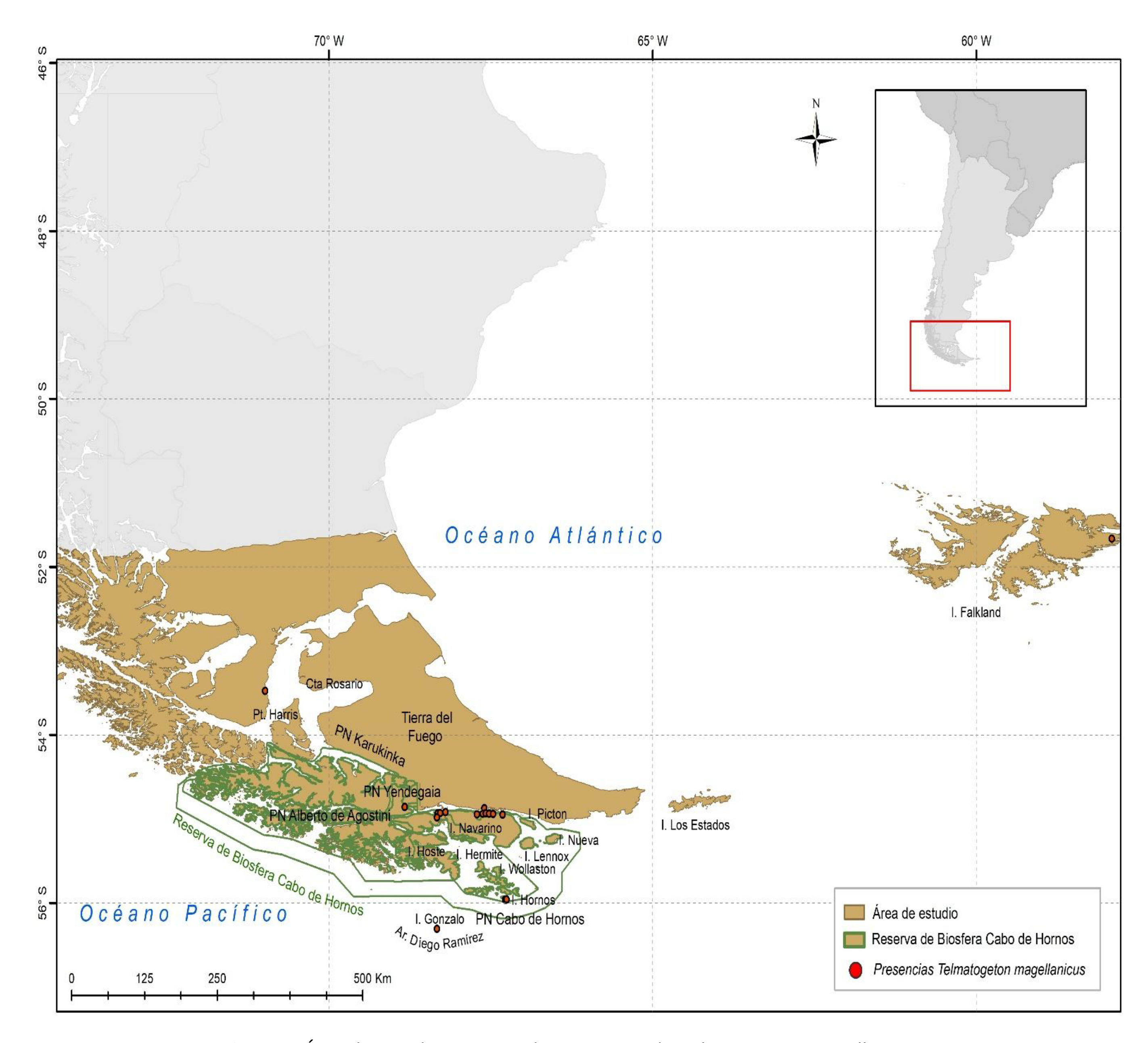


Figura 1. Área de Estudio y puntos de presencias de *Telmatogeton magellanicus*.

2.1.2. *Preparación de las variables climáticas*

WORDLCLIM (Hijmans et al., 2005; Fick and Hijmans, 2017) es una plataforma climática mundial que alberga conjuntos de datos para el pasado, el presente y escenarios climáticos futuros. En este trabajo, escogimos el conjunto de 19 variables bioclimáticas a 30 segundos de resolución espacial (aproximadamente 0.86 km^2 en la línea del ecuador). Estas variables bioclimáticas derivan de los valores mensuales de temperatura y precipitación para generar variables biológicamente más significativas, representan tendencias anuales (p. ej., temperatura media anual, precipitación anual), estacionalidad (p. ej., rango anual de temperatura y precipitación) y factores ambientales extremos o limitantes (p. ej., temperatura del mes más frío y cálido, y precipitación de los meses húmedo y cálido). Las variables bioclimáticas se descargaron para la época actual y para escenarios climáticos futuros del modelo de circulación general HadGEM3-GC31-LL. Los escenarios climáticos fueron dos de los cuatro escenarios "*Shared Socio-economic Pathways* (SSP)" predichos por IPCC: un escenario intermedio SSP2-4.5 que fija una emisión de 650 ppm de CO_2 lo que implicaría un aumento medio de la temperatura ambiente de 2.4°C por sobre la temperatura preindustrial; y el escenario más catastrófico SSP5-8.5, que fija una emisión de 1370 ppm de CO_2 y un aumento de la temperatura de aproximadamente 5°C para 2100 (Nolan et al., 2018).

Las variables se recortaron a la extensión de la zona de estudio y se transformaron al formato válido (ascII) para trabajar con el algoritmo de modelación de nicho ecológico escogido. Posteriormente, ya que la mayoría de los algoritmos de modelado son sensibles a niveles altos de correlación entre las variables predictoras se realizó un análisis de correlación de Pearson con el fin de eliminar aquellas que tenían una correlación mayor a (-) 0.75. Cuando fue difícil la elección de alguna de ellas frente a otra, se escogió aquella con un significado biológico más importante dado el conocimiento ecológico de la especie (Petitpierre et al., 2017). Todos los análisis antes mencionados se hicieron con el software RStudio 2022.02.2+485.

2.3. Selección del algoritmo de modelación

El algoritmo seleccionado fue un algoritmo de presencias y *background*, MaxEnt v3.4.1 (Phillips et al., 2006) (http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/). Es un algoritmo utilizado frecuentemente para simular cambios en el rango de especies y escenarios climáticos actuales y futuros (Wei, 2018). Se basa en un marco probabilístico, asumiendo que la distribución de probabilidad empírica incompleta (basada en la presencia de especies), puede aproximarse mediante una distribución de probabilidad de máxima entropía, que representa la distribución geográfica potencial de una especie. Además, MaxEnt generalmente proporciona buenos resultados con tamaños de muestra pequeños (Elith et al., 2011). En la calibración del modelo se utilizó por defecto $\beta=1$, el 70% de los datos disponibles se utilizaron como datos de entrenamiento y el 30% restante se utilizó para evaluar el modelo con 50 repeticiones y 5000 puntos de pseudoausencias.

2.4. Generación de los modelos de distribución o ENM

Para elegir el modelo más adecuado utilizamos los índices de "área bajo la curva" AUC (Tuiller et al., 2005) y Boyce (Boyce et al., 2002). Los valores de AUC oscilan entre 0 y 1, y un valor de 0.5 o inferior indica que el modelo no es mejor que el azar. Los valores de Boyce pueden oscilar entre −1 y +1, donde el valor de +1 indica un rendimiento perfecto del modelo, un valor de 0 no es mejor que el azar y los valores negativos indican modelos inversos. Para interpretar los resultados en un mapa, asignamos 4 niveles de idoneidad del hábitat a partir de la elección del "umbral de presencia más bajo (LPT) " (Pearson et al., 2007).

Finalmente, creamos mapas de los ENM obtenidos usando ArcGIS 10.4.1 y QGIS v3.24 Tisler (QGIS Development Team 2016. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. http://qgis.osgeo.org).

3. RESULTADOS

Las variables climáticas seleccionadas después del análisis de correlación fueron bio 1 (temperatura promedio anual), bio 3 (isotermalidad), bio 6 (temperatura mínima del mes más frío), bio 7 (rango de temperatura anual), bio 8 (temperatura promedio del mes más húmedo), bio 12 (precipitación anual) y bio 15 (estacionalidad de la precipitación). Las variables que más contribuyen al modelo y que explicarían en mayor medida la distribución de *T. magellanicus* son bio 6, bio 7 y bio 3 (Tabla 1), entre las tres explican el 70%. El modelo tiene un índice AUC de 0.98 y un índice Boyce de 0.93, indicando ambos índices que nos encontramos ante un muy buen ENM o modelo de distribución. Con un LPT de 0.19, los niveles o categorías que asignamos para poder visualizar los ENM en los mapas fueron: 1. Hábitat no idóneo (probabilidad muy baja, entre 0 y 0.2); 2. Hábitat un poco idóneo (probabilidad media baja, entre 0.21 y 0,5); 3. Hábitat idóneo (probabilidad media alta, entre 0.51 a 0.75); y, por último, 4. Hábitat muy idóneo (probabilidad muy alta, entre 0.76 y 1).

Tabla 1. Contribución de las variables seleccionadas al modelo.

VARIABLE	*% Contribución*
Bio 6	33.2
Bio 7	22.5
Bio 3	14.7
Bio 8	13
Bio 15	9
Bio 12	7.3
Bio 1	0.4

Los resultados generados para la actualidad muestran una alta probabilidad de hábitat idóneo en la costa oeste del parque natural Karukinka, en Puerto Harris y al sur de Porvenir en caleta Rosario. Del mismo modo, en la costa sur de Tierra del Fuego, la costa norte y oeste de isla Navarino y sobre todo en el sur, en el seno Grandi y Bahía Winhood. También son hábitats muy idóneos la costa sureste de la isla Hoste, de la isla Picton, Nueva y Lenox. La costa norte del parque nacional Cabo de Hornos, concretamente las islas Hermite y Wollaston, la costa este de la isla de los Estados, al este de Argentina, y con menos probabilidades en la costa oeste de las islas Falkland (Figura 2).

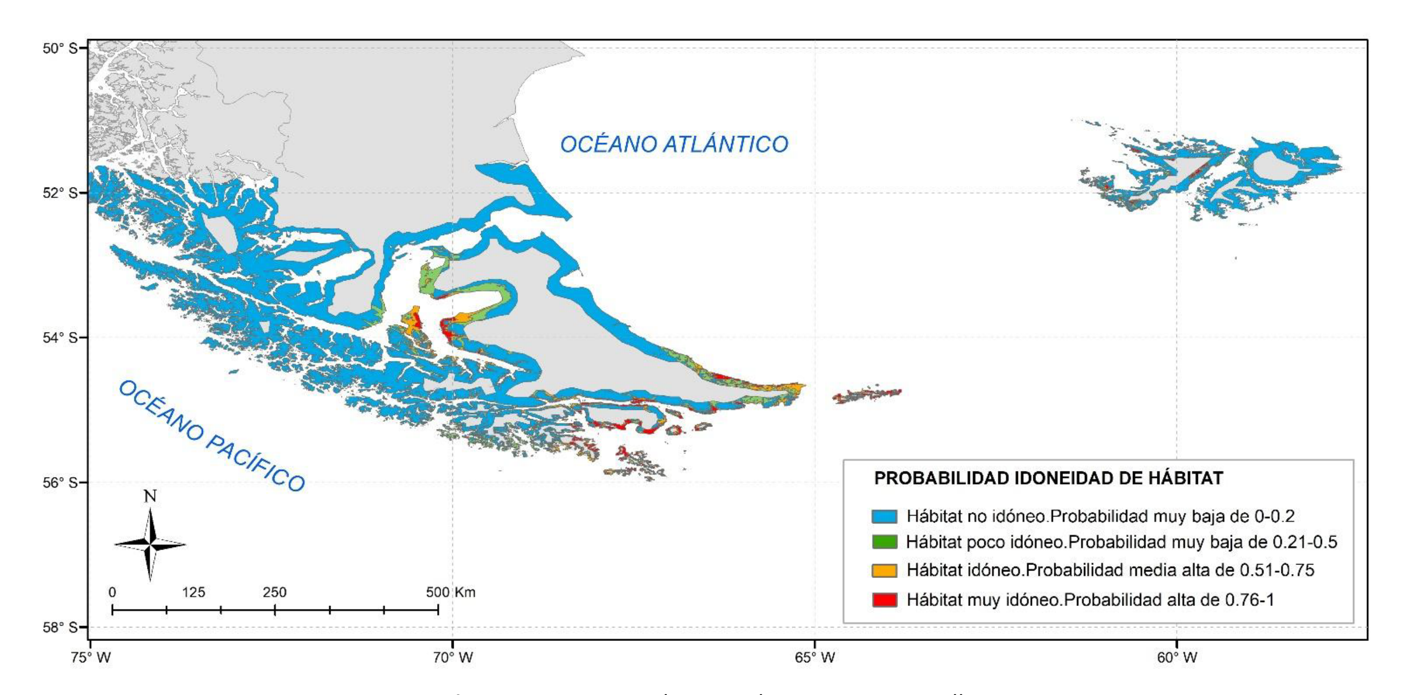


Figura 2. ENM actual para *Telmatogeton magellanicus.*

Para el escenario climático SSP2-4.5, en el período del 2040-2060 disminuye la probabilidad de hábitat idóneo en Puerto Harris, isla Picton y las Falkland, pero se mantiene para el resto de los lugares idóneos aumentando en la costa sur de isla Hoste y la costa suroeste y sur de isla Navarino. En cambio, para el período 2080-2100, disminuye la probabilidad de idoneidad de hábitat en general, manteniéndose solamente los hábitats con alta probabilidad de ser idóneos algunas zonas de la costa este de la isla Hoste, noroeste-oeste-sur de la isla Navarino (Figura 3).

Para el escenario climático SSP5-8.5, en el período del 2040 – 2060, es bastante parecido al escenario SSP-4.5, desapareciendo en Puerto Harris, isla Picton, islas Falkland y las Wollaston. Disminuye bastante en la costa oeste del Parque Natural Karukinka e isla de los Estados. En cambio, la probabilidad de hábitat idóneo aumenta alrededor de toda la isla Navarino, apareciendo hábitat idóneo en la costa este, cerca de Puerto Toro. En cambio, para el período 2080-2100, prácticamente desaparece toda probabilidad de hábitat idóneo para la especie, quedando alguna zona en la costa norte de isla Navarino y costa sur de Tierra del Fuego (Figura 4).

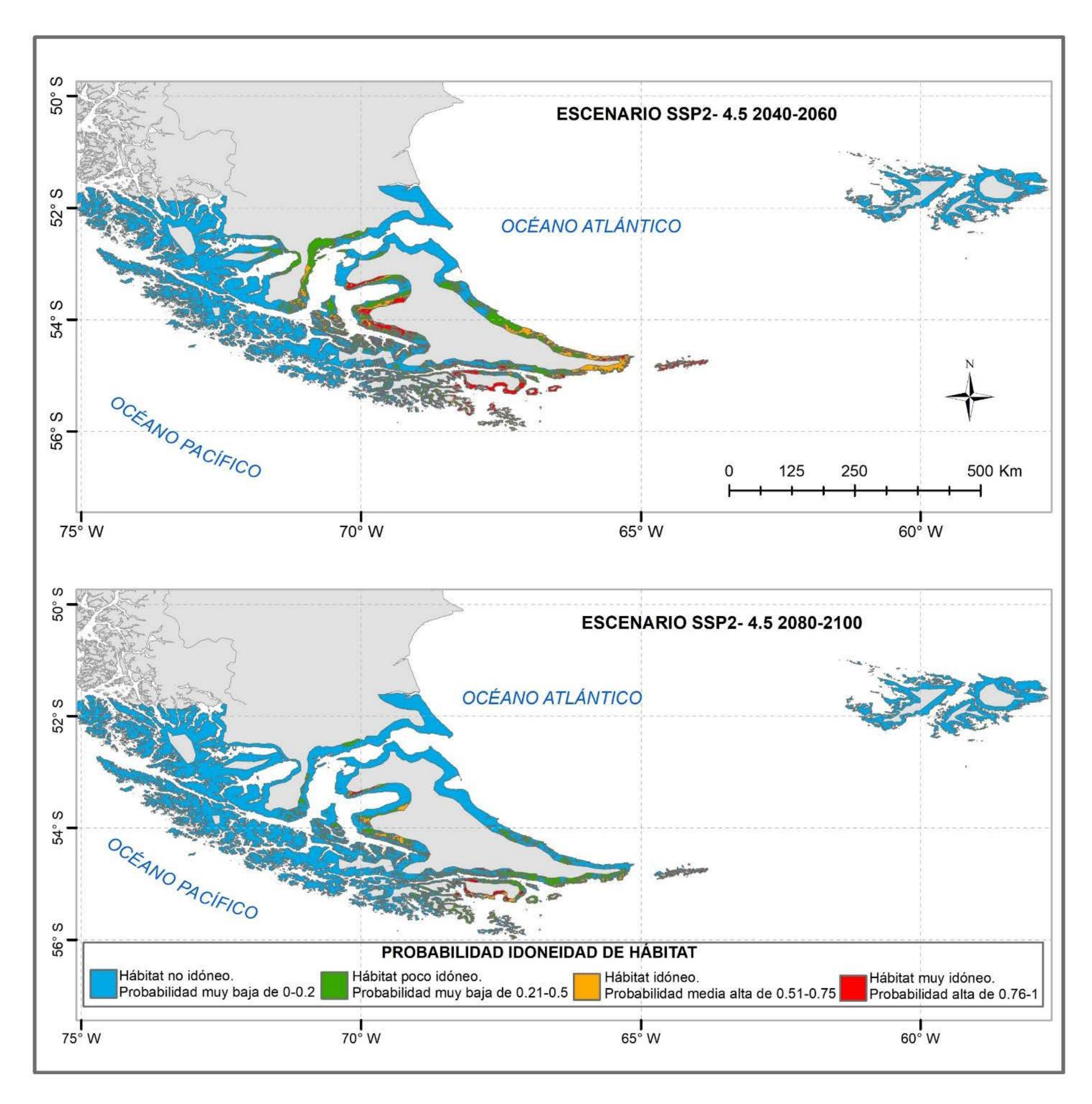


Figura 3. ENM para el escenario climático SSP2-4.5 para el período 2040-2060 y 2080-2100.

Si visualizamos esto desde el punto de vista del porcentaje (%) de hábitat idóneo para cada escenario, observamos que actualmente *T. magellanicus* ocupa solamente el 1.6% del área de estudio, para el período 2040 – 2060 en ambos escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 aumenta su probabilidad de hábitat idóneo a un 2.5% y un 1.9% del área de estudio respectivamente, en cambio para el período 2080-2100, en ambos escenarios disminuye su porcentaje (%) de idoneidad de hábitat a un 1.3% y un 0.4% (Figura 5).

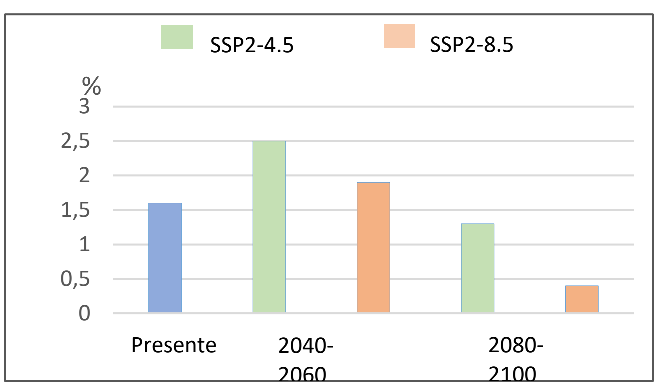


Figura 5. Porcentaje de idoneidad de hábitat para *T. magellanicus* en cada escenario SSP

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este estudio, nuestro objetivo fue evaluar los cambios en los patrones de distribución del díptero quironómido intermareal nativo, *Telmatogeton magellanicus*, como respuesta a los efectos del cambio climático en el sur de la ecorregión subantártica de Magallanes, donde se encuentra la Reserva de Biosfera Cabo de Hornos.

Primero, identificamos que la distribución de *T. magellanicus* se explica mejor por la temperatura mínima del mes más frío (bio 6) y por el rango de temperatura anual (bio 7). Los insectos son sensibles a la variación térmica ambiental, la evidencia acumulada sugiere que esta variación provoca cambios relacionados con la fenología de los insectos acuáticos pudiendo afectar la sincronización entre las etapas de la historia de vida y la disponibilidad de alimento o hábitat, lo que llevaría a un desacoplamiento temporal que, a su vez, podría resultar en colapsos demográficos o extinciones (Parmesan y Yohe, 2003). Bradie y Leung (2016) demostraron que, de 400 variables ambientales distintas en 2040 ENM estudiados, las variables más importantes que explicaban la distribución de la clase Insecta eran la temperatura, la precipitación y la dispersión del hábitat.

El ENM obtenido para la distribución actual de *T. magellanicus* muestra que la mayor parte de hábitat idóneo se concentra principalmente en la RBCH, Tierra del Fuego y la isla de los Estados. La proporción de hábitat idóneo que la especie puede ocupar es baja, siendo menos del 2% del área de estudio. Esto concuerda con lo que conocemos sobre la especificidad de hábitat de *T. magellanicus*, sometido a los ciclos de mareas y expuesto a condiciones ambientales extremas. El hábitat de la especie está principalmente asociada a playas de piedras y algas tipo *Bostrychia* sp. y *Ulva intestinalis*, las cuales probablemente proporcionan un buen refugio frente a las temperaturas extremas, radiación y exposición al fuerte viento característico de esta zona (Simões et al., 2020). Teniendo esto en cuenta, habría que considerar modelar la distribución de estas especies de algas e incluir este resultado como variables en el algoritmo de modelado, lo que permitiría afinar con más detalle y comprender mejor la distribución actual de *T. magellanicus*

De las proyecciones del modelo, podemos concluir que el área de hábitat adecuado para *T. magellanicus* aumentará a corto plazo (2040-2060) en ambos escenarios SSP, expandiéndose sobre todo hacia la zona sur de la RBCH (costa de la isla Navarino, isla Hoste e islas del norte del PN Cabo de Hornos). En cambio, para un futuro algo más lejano (2080-2100) la probabilidad de hábitat idóneo para la especie disminuye, quedando muy reducido en el escenario más catastrófico de emisiones de gases de efecto invernadero (ssp5-8.5). Por lo tanto, las consecuencias ecológicas del cambio climático no favorecerían a *T. magellanicus*, llegando casi a eliminar por completo su hábitat idóneo, lo que podría conducir a la extinción local de varias poblaciones.

Los ENM obtenidos sientan las bases para futuros estudios sobre la ecología y biología general del insecto, así como para generar modelos más completos, que integren información sobre la fenología y fisiología de la especie, los llamados modelos mecanicistas. La combinación de ambos tipos de modelos genera predicciones más robustas que mejoran la interpretación de los resultados (Kearney y Porter, 2009; Pertierra et al. 2020). En próximos estudios, se abarcará este tipo de información para la construcción de modelos mecanicistas de T. magellanicus.

Finalmente, es importante destacar que existen otros estudios de modelado de nicho en la región antártica donde se utiliza la familia de quironómidos *Parochlus steinenii* y *Eretmoptera murphyi* para evaluar cambios en los patrones de distribución bajo escenarios de cambio climático (Contador et al., 2020), o bien para predecir hábitats con riesgo de ser invadidos (Bartlett et al., 2020). Por lo tanto, esta familia, en general, puede ser considerada como buena centinela de cambio climático. En el caso concreto de *T. magellanicus*, además, la vulnerabilidad a la que esta especie podría verse sometida frente a un avance del cambio climático, facilita un seguimiento y una alerta temprana de este proceso, posicionando a *T. magellanicus* como un buen centinela.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por ANID – Programa Iniciativa Científica Milenio – ICN2021_002 y ANID/BASAL FB210018. JRC agradece a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) por la beca doctoral BECAS CHILE/2021 – 21212048. PC agradece a NERC financiamiento basal al British Antarctic Survey (BAS) a través del 'Biodiversity, Evolution and Adaptation' Team. Por último, se agradece a todas y todos los que colaboraron con los puntos de presencia de la especie.

5. BIBLIOGRAFÍA

Angelieri, C.C.S., Adams-Hosking, C., Ferraz, K.M.P., de Souza, M. P. & McAlpine, C.A. (2016) Using species distribution models to predict potential landscape restoration effects on puma conservation. *PLoS ONE*, 11, e0145232

Báez, J.C., Barbosa, A.M., Pascual, P., Ramos, M.L., Abascal, F. (2020). Ensemble modeling of the potential distribution of the whale shark in the atlantic ocean. *Ecol. Evol*. 10, 175–184. https://doi.org/10.1002/ece3.5884.

Barbosa, M.A., Sillero, N., Martínez-Freiría, F., Real, R. (2012). Ecological niche models in mediterranean herpetology: past, present and future. *Ecological Modelling*. WenJun Zhang, pp. 173–204.

Bartlett, J. C., P. Convey, and L. R. Pertierra. (2020). "An Insect Invasion of Antarctica: The Past, Present and Future Distribution of Eretmoptera Murphyi (Diptera, Chironomidae) on Signy Island." *Insect Conservation and Diversity / Royal Entomological Society of London*. https://resjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/icad.12389

Boyce, M., Vernier, P., Nielsen, S. & Schmiegelow, F. (2002). Evaluating resource selection functions. *Ecol. Modell*. 157, 281–300.

Bradie, J. & Leung, B. (2016). A quantitative synthesis of the importance of variables used in MaxEnt species distribution models. *Journal of Biogeography*, 1–18. https://doi.org/10.1111/jbi.12894

Contador, T. A., Kennedy, J. H., Ojeda, J., Feinsinger, P., & Rozzi, R. (2014a). Ciclos de vida de insectos dulceacuícolas y cambio climático global en la ecorregión subantártica de Magallanes: investigaciones ecológicas a largo plazo en el Parque Etnobotánico Omora, Reserva de Biosfera Cabo de Hornos (55°S). *Revista Bosque*, 35(3), 429-437.

Contador, T., Gañan, M., Bizama, G., Fuentes-Jaque, G., Morales, L., Rendoll-Cárcamo, J., Simões, F., Kennedy, J., Rozzi, R., Convey, P. (2020). Assessing distribution shifts and ecophysiological characteristics of the only Antarctic winged midge under climate change scenarios. *Scientific Reports*. 10. 10.1038/s41598-020-65571-3.

Convey, P. et al. (2018). Ice - Bound Antarctica: Biotic consequences of the shif from a temperate to a polar Climate. in Mountains, Climate and Biodiversity (eds. Hoorn, C., Perrigo, A. & Antonelli, A.) 355–374 (John Wiley & Sons Ltd.

Elith, J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Yung, E., Yates, C. (2011). A statistical explanation of MAXENT for ecologists. *Diversity and Distributions*. 17. 43 - 57. 10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x.

Elster, J. (2020). "Life in extreme environments and the responses to change: The example of polar environments". In G. Di Prisco, H. Edwards, J. Elster, & A. Huiskes (Eds.), Life in Extreme Environments: Insights in Biological Capability (Ecological Reviews, pp. 149-296). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781108683319.010

Fick, S.E., Hijmans, R.J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. Int. J. *Climatol*. 37, 4302–4315. https://doi.org/ 10.1002/joc.5086

Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P. & Jarvis, A. (2005). Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int.J. Climatol*. 25, 1965–1978.

Lee, J. R., Raymond, B., Bracegirdle, T. J., Chades, I., Fuller, R. A., Shaw, J. D., & Terauds, A. (2017). Climate change drives expansion of Antarctic ice-free habitat. *Nature*, 547(7661), 49-54.

Nolan, C., Overpeck, J., Allen, J., Anderson, P., Betancourt, J., Binney, H., et al. (2018). Past and future global transformation of terrestrial ecosystems under climate change. *Science* (80-.). 361, 920–923.

Parmesan, C. & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature 421, 37–42.

Pearson, R., Raxworthy, C., Nakamura, M. & Peterson, T. (2007). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *J. Biogeogr*. 34, 102–117.

Pertierra, L. R., J. C. Bartlett, and G. A. Duffy. (2020). "Combining Correlative and Mechanistic Niche Models with Human Activity Data to Elucidate the Invasive Potential of a sub-Antarctic Insect." *Journal of*. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jbi.13780.

Peterson, A.T., Soberón, J., Pearson, R.G., Anderson, R.P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., Araújo, M.B., 2011. Ecological Niche and Geographical Distributions. Princenton University Press, New Jersey.

Petitpierre, B., Broennimann, O., Kueffer, C., Daehler, C., Guisan, A. (2017). Selecting predictors to maximize the transferability of species distribution models: lessons from cross-continental plant invasions. *Glob. Ecol. Biogeogr*. 26, 275–287. https:// doi.org/10.1111/geb.12530.

Phillips, S., Anderson, R. & Schapire, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Modell*. 190, 231–259.

Rendoll-Cárcamo, J., Contador, T., Gañán, M., Pérez, C., Maldonado, A., Convey, P., Kennedy, J., Rozzi, R. (2019) Altitudinal gradients in Magellanic sub-Antarctic lagoons: the effect of elevation on freshwater macroinvertebrate diversity and distribution. *PeerJ*, 7:e7128. http://doi.org/10.7717/peerj.7128

Rozzi R, JJ Armesto, JR Gutiérrez, F Massardo, GE Likens, CB Anderson, A Poole, K Moses, G Hargrove, A Mansilla, JH Kennedy, M Wilson, K Jax, C Jones, BJ Callicott, M Arroyo. (2012). Integrating Ecology and Environmental Ethics: Earth Stewardship in the Southern End of the Americas. *BioScience* 62(3): 226-236.

Sillero, N., Arenas-Castro, S., Enriquez-Urzelai, U., Vale, C. G., Sousa-Guedes, D., Martínez-Freiría, F., ... & Barbosa, A. M. (2021). Want to model a species niche? A step-by-step guideline on correlative ecological niche modelling. *Ecological Modelling*, 456, 109671.

Sillero, N. (2010). Modelling new suitable areas for *Hyla meridionalis* in a current and future expansion scenario. *Amphibia-Reptilia* 31, 37–50.

Simões, F., Contador-Mejías, T., Rendoll-Cárcamo, J., Pérez-Troncoso, C., Hayward, S. A., Turner, E., & Convey, P. (2020). Distribution and habitat preferences of the newly rediscovered Telmatogeton magellanicus (Jacobs, 1900)(Diptera: Chironomidae) on Navarino Island, Chile. *Insects*, 11(7), 442.

Tuiller, W., Lavorel, S. & Araújo, M. B. (2005). Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. *Global Ecology and Biogeography* 347–357. https://doi.org/10.1111/j.1466-822x.2005.00162.x.

Wang, R., Li, Q., He, S., Liu, Y., Wang, M. & Jiang, G. (2018). Modeling and mapping the current and future distribution of Pseudomonas syringae pv. actinidiae under climate change in China. *PLoS One* 1–21, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192153.

Wei, J., Zhao, Q., Zhao, W. & Zhang, H. (2018). Predicting the potential distributions of the invasive cycad scale Aulacaspis yasumatsui (Hemiptera: Diaspididae) under different climate change scenarios and the implications for management. PeerJ https://doi. org/10.7717/peerj.4832.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 286-295

Cartografía de *Posidonia oceanica* a partir de imágenes de Sentinel-2. Aplicación en la costa de Jávea (Alicante)

D. Górriz Pereira[1], M.J. López García[2], J. Delegido Gomez[3], A. Muruaga Ilazarri[1], M. Candelas Perez[4]

[1] Departamento de Consultoría Medioambiental, GAMASER-Global Omnium. C. Corretger 51, 46980, Paterna, Valencia.
[2] Departamento de Geografía, Universitat de València. Av. Blasco Ibáñez 28, 46010 Valencia.
[3] Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Universitat de València. C. Dr. Moliner 50, 46100, Burjassot, Valencia.
[4] Área Mediterráneo y Medusas, Avanqua Oceanogràgic. C. Eduardo Primo Yúfera (Cientific) 1B, 46013, Valencia.

dagope@globalomnium.com, Maria.J.Lopez@uv.es, Jesus.Delegido@uv.es, amuruila@globalomnium.com, mcandelas@oceanografic.org

RESUMEN: La *Posidonia oceanica* es una planta marina endémica del mar Mediterráneo que forma praderas submarinas y desempeña un papel fundamental en los ecosistemas marinos por muchas razones, entre ellas su alto valor como especie bioindicadora de la calidad de las aguas marinas debido a su estrecha relación en los procesos biológicos, biogeoquímicos y físicos de las zonas costeras. La presión antrópica y otros cambios ambientales a escala global han hecho que durante mucho tiempo y actualmente se haya producido una regresión de estas praderas y una pérdida de esta especie a unos niveles irreversibles. Su conservación requiere de cartografías precisas para estimar la extensión de las praderas existentes y evaluar los cambios temporales. El objetivo de este trabajo es valorar las posibilidades que ofrecen los datos de Sentinel-2, disponibles con un tiempo de revisita de 5 días y una alta resolución espacial de 10 metros, en el monitoreo de estos ecosistemas, en concreto en la costa del término municipal de Jávea (Alicante).
Se muestran espectros de *P. oceanica* y la influencia del tipo de corrección atmosférica, profundidad y fecha de obtención de las imágenes sobre los mismos. Se observa que una corrección adecuada para este tipo de trabajos es Sen2cor y, que a partir de los 10 metros de profundidad las praderas se confunden mayormente con el fondo sedimentario y que a partir de los 15 metros no se consiguen detectar. Finalmente, se propone un nuevo índice espectral *Fracción de Cobertura de Posidonia* (FCP) que consigue cuantificar el porcentaje de suelo cubierto por *P. oceanica* a partir de una combinación de 3 bandas de Sentinel-2, válido para profundidades inferiores a 10 m en la costa de Jávea.

Palabras-clave: *Posidonia oceanica*, cartografía marina, Sentinel-2, multiespectral.

1. INTRODUCCIÓN

El mar Mediterráneo se encuentra cada vez más amenazado por la presión de los distintos tipos de actividades humanas que en él se desarrollan, las cuales degradan los ecosistemas marinos y en consecuencia disminuyen su biodiversidad. La vida marina depende de un equilibrio fisicoquímico, y aunque algunos organismos son capaces de soportar grandes variaciones ambientales siempre se produce un detrimento de la biodiversidad, principalmente en las especies más sensibles y exigentes de una buena calidad de las aguas.

La *P. oceanica* reúne todas las características necesarias propias de una especie bioindicadora y se viene empleando como tal desde hace muchos años. La presencia de esta angiosperma marina constituye una de las comunidades climácicas más importantes del Mar Mediterráneo por el elevado nivel de desarrollo y complejidad que un ecosistema costero infralitoral puede alcanzar. Esto es una prueba evidente de que los ecosistemas marinos vecinos gozan de una buena calidad y un buen estado de conservación. Dada la importancia que tiene este ecosistema para la conservación de la biodiversidad marina y por muchas otras y variadas razones, este ecosistema ha sido clasificado como "hábitat prioritario" en el anexo I de la Directiva Hábitat y resulta fundamental profundizar en el estudio de su estado de conservación, conocer su evolución y, en el futuro, establecer modelos predictivos para contribuir a la adecuada gestión del medio ambiente litoral.

Para el control de las praderas de *Posidonia oceanica*, se combinan dos técnicas de estudio. Por un lado, se desarrollan cartografiados bionómicos para delimitar su extensión, y por otro lado se emplean una

serie de indicadores para evaluar el estado o condición de las mismas. En este último caso, se seleccionan una serie de variables y/o índices que son buenos descriptores locales de la estructura de este tipo de hábitat e indicadores de su estado de salud, ya que son sensibles a los cambios ambientales que afectan a la pradera. Estos descriptores se miden *in situ* en inmersión con equipo autónomo de buceo, lo cual requiere cierto esfuerzo de campo (Bonin-Font al., 2016).

Como parte del esfuerzo de la investigación multidisciplinar, resulta esencial la búsqueda de nuevas tecnologías de monitoreo rápidas, fiables y efectivas de *Posidonia oceanica*. En este sentido, la teledetección ofrece un método rentable para monitorizar espacial y temporalmente sus hábitats en aguas someras (Fornes et al., 2006; Pu et al., 2012). Esto abre camino a una nueva forma de gestión de las reservas naturales basada en el análisis de datos y el conocimiento de campo, una mejor comprensión de las praderas marinas y su cobertura con condiciones ambientales fluctuantes, además de la creación de modelos predictivos de tendencias cualitativas y/o cuantitativas futuras. Estos datos se pueden utilizar como una herramienta interpretativa para comprender los cambios en la salud de las praderas marinas definidos por su área y abundancia en diferentes escalas espaciotemporales (Poursanidis et al., 2019).

Este trabajo nace con la idea de contribuir al conocimiento del estado actual y de la evolución del grado de conservación de las praderas de *Posidonia oceanica* en el Mediterráneo, complementando y facilitando los métodos tradicionales de control a través de las técnicas de teledetección espacial y los nuevos sensores del satélite Sentinel-2 disponibles de forma gratuita a través del Programa Copernicus.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. Zona de estudio

Para este trabajo se ha escogido el sector litoral del municipio de Jávea (Alicante) por sus aguas de elevada transparencia y su gran superficie de praderas de *P. oceanica* densas, lo que la hacen una zona óptima para su estudio por teledetección, y por la elevada presión antrópica a la que están sometidas, relacionada principalmente con el turismo de la zona.

En concreto, el estudio abarca las zonas comprendidas entre Cala Tangó y Cala de la Granadella (figura 1) ocupando una extensión de 17 km de costa aproximadamente. En toda la franja costera de Jávea se extienden praderas de *Posidonia oceanica* con una densidad muy elevada. (Ruiz et al., 2015).



Figura 1. Mapa de localización del área de estudio (Jávea, Alicante). Fuente: Google Earth.

2.2. Datos de campo y de teledetección

2.2.1. Datos in situ

Recientemente, en 2018-19, se ha actualizado la cartografía bionómica de los fondos marinos del área de estudio. Esta actualización se ha llevado a cabo por la Fundación Oceanogràfic en el marco del Projecte Xàbia. Esta cartografía se centra precisamente en las praderas de fanerógamas marinas de la zona explorada, en particular en las praderas de *P. oceanica*. Los resultados se emplearán como verdad-terreno para este trabajo. La actualización de la cartografía bionómica del área en estudio se ha realizado mediante la combinación de técnicas acústicas (exploración con sónar de barrido lateral) y videográficas (transectos con cámara submarina remolcada) con sistemas de posicionamiento y georreferenciación de los registros que posteriormente han sido procesados y representados mediante un software para la gestión de información geográfica (QGIS). Del mismo modo, también se han realizado numerosas inmersiones con equipos de buceo autónomo para evaluar el estado de conservación de las praderas de *P. oceanica*, mediante una serie de descriptores predefinidos.

Con los datos digitalizados, se confeccionan los planos de resultados de la situación y límites de las distintas tipologías de fondos y poblamientos, distinguiendo los sectores en los que las principales biocenosis presentan aspectos estructurales o de estados de conservación diferentes y remarcando el resto de los elementos de interés.

2.2.2. Imágenes Sentinel-2

Sentinel-2 es una constelación de satélites del programa Copernicus de la Unión Europea. Con una resolución espacial de 10 metros y un tiempo de revisita de 5 días proporciona imágenes multiespectrales gratuitas y ha demostrado ser un instrumento óptimo para estudios de agua y vegetación (Pasqualotto et al., 2019). Para evaluar el potencial de las imágenes de Sentinel-2 en la detección de praderas de *P. oceanica*, se seleccionaron imágenes libres de nubes de la toda la costa de Jávea (Alicante) de los meses de marzo y abril, con el objetivo de coincidir con las fechas de recolección de datos en campo de la cartografía de sonar de barrido lateral, y en noviembre para evaluar la existencia o no de variación interanual.

Todas se descargaron de nivel 1C, ortorectificadas y con niveles de reflectancia por encima de la atmósfera (Top of Atmosphere, TOA). En concreto se han descargado del servidor de la Agencia Espacial Europea (ESA) las imágenes de 17 de marzo, 11 de abril y 12 de noviembre de 2019.

2.3. Metodología

2.3.1. Definición de clases temáticas y elaboración de curvas espectrales

Esta primera parte del estudio se centra en la caracterización de las clases de *Posidonia oceanica* en los rangos de profundidad de 0-10 y 10-15 metros. También se han comparado los espectros obtenidos con el fondo cubierto de *P. oceanica* con los de los de suelos desnudos a distintas profundidades, fechas y sitios, con tres métodos de corrección atmosférica diferente para seleccionar el más adecuado. Todo ello a través de la herramienta *Sentinel Application Platform* (SNAP), el software libre de la ESA utilizado para el procesamiento de las imágenes Sentinel.

Con este fin, se selecciona un amplio conjunto de píxeles puros de las clases representativas del fondo marino de la costa de Jávea. Para ello, se remuestrearon todas las bandas de las imágenes a 10 y a 60 metros. A continuación, se visualizó una composición RGB y se importaron las capas de batimetría y clases de fondo de suelo y vegetación procedentes de la cartografía de verdad terreno. Se escogieron píxeles de 60 metros lo más centrados posible en los polígonos de cada clase para evitar el efecto borde y de adyacencia, se extrajeron los espectros de los píxeles de 10 metros correspondientes y se calculó la mediana para las clases de fondo sedimentario y *Posidonia oceanica*, en los rangos de profundidad entre 0-10 metros y 10-15 metros (Tabla 1).

Tabla 1. Nº de pixeles puros seleccionados por clase y profundidad

CLASE	*Profundidad (m)*	*Nº Píxeles*
Posidonia oceanica	0-10 m	814
	10-15 m	828
Fondo sedimentario	0-10 m	575
	10-15 m	648

Las imágenes de Sentinel-2 de nivel 2A de la ESA (reflectividad en Bottom of Atmosphere, BOA) están corregidas atmosféricamente con la herramienta Sen2cor. No obstante, la corrección atmosférica aplicada no es apta para algunos estudios de calidad de aguas debido a su baja reflectividad. Para ello se han desarrollado diferentes métodos de corrección atmosférica específicos para aguas, entre ellos el Case 2 Regional Coast Colour (C2RCC), un procesador desarrollado para la estimación de los constituyentes del agua a partir de la inversión de una base de datos de simulaciones de transferencia radiativa y redes neuronales, que puede ser aplicado a una diversa cantidad de sensores (Brockmann et al., 2016).

Dentro del procesador de C2RCC, la opción de corrección C2X-Nets es una adaptación para aguas continentales debido a que presentan mayor cantidad de materia orgánica y clorofila. Aunque en este estudio se trata una zona de agua marina, se ha evaluado también esta versión pues a veces el agua en estas zonas puede aumentar su turbidez por distintas causas. En la segunda fase del estudio, a modo de prueba y para evaluar qué corrección atmosférica es más adecuada para el estudio, se corrigen las imágenes descargadas de las fechas 17/03/2019, 11/04/2019, 12/11/2019 con las herramientas C2RCC, C2X-Nets y Sen2cor en SNAP. Para ello se emplean las imágenes remuestreadas a 10 metros y se extraen los espectros de los píxeles seleccionados (en la Tabla 1) para cada corrección y fecha, representándose para su análisis posterior.

2.2.3. Definición y validación de índices

Para la definición de índices espectrales que permitan la diferenciación de la *P. oceanica* respecto del fondo arenoso se plantea la definición de una variable biofísica cuantitativa que pueda correlacionarse con una combinación de bandas. En esta segunda parte del estudio se ha definido una variable similar a la fracción de cobertura vegetal empleada en estudios de vegetación, calculada en este caso como % cobertura de *Posidonia oceanica* que denominamos *Fracción de Cobertura de Posidonia* (FCP) y que varía entre 0, para fondos marinos con suelos totalmente desnudos, y 100 para fondos totalmente cubiertos de *P. oceanica.*

Para definir esta variable se ha elegido la imagen de marzo de 2019 corregida con Sen2cor y remuestreada a 10 metros. En una zona de pradera de *P. oceanica* visible desde la composición RGB, en la playa Segon Muntanyar, se han seleccionado cuadrados de 100 píxeles con distintos porcentajes de cobertura de *P. oceanica* y se han extraído los espectros que posteriormente se relacionan con el valor FCP correspondiente. A continuación, se calcula la media y se representan los espectros para cada FCP para analizar las bandas que tienen más influencia en la variable, buscando un índice espectral que obtenga alta correlación.

Para la validación de este índice, se aplica el índice sobre píxeles aleatorios en distintas zonas, profundidades y fechas. Se considera que el índice es adecuado cuando los valores calculados y los medidos en campo tienen un bajo error cuadrático medio (RMSE). Si la validación de este índice no es buena, buscaremos un índice más genérico a partir de una serie de píxeles obtenidos de distintas zonas y fechas. Para ello utilizaremos la herramienta ARTMO (Automated Radiative Transfer Models Operator) (Verrelst et al, 2011). Esta toolbox contiene diferentes herramientas usadas en teledetección, entre ellas un evaluador de índices espectrales que busca la mejor correlación entre una variable biofísica y diferentes combinaciones de bandas ofreciendo el mejor coeficiente de correlación y el menor RMSE. Para ello utiliza el método de validación cruzada, que divide la base de datos en N partes utilizando cada subgrupo como validación y el resto como calibración, calculando después el promedio de los estadísticos R^2 y RMSE en todos los subgrupos. Los índices que se han estudiado son índices genéricos de amplio uso en teledetección para variables biofísicas del agua y de la vegetación, son los mostrados a continuación (Pasqualotto et al., 2019).

$$Simple\ ratio\ (SR) = \mathrm{b1}/\mathrm{b2} \tag{1}$$

$$Índice\ de\ diferencia\ normalizado\ (NDI) = (\mathrm{b1} - \mathrm{b2})/(\mathrm{b1} + \mathrm{b2}) \tag{2}$$

$$Tribanda\ de\ Dall\ Olmo\ (TBDO) = \mathrm{b1}((1/\mathrm{b2}) - (1/\mathrm{b3})) \tag{3}$$

$$Índice\ de\ diferencias\ de\ 3\ bandas\ (DI_3b) = (\mathrm{b1} - \mathrm{b2})/(\mathrm{b3} - \mathrm{b2}) \tag{4}$$

$$Índice\ de\ diferencia\ normalizado\ menos\ 2b\ (NDI_r3b) = (\mathrm{b1} - \mathrm{b2})/(\mathrm{b1} + \mathrm{b2} + 2\mathrm{b3}) \tag{5}$$

$$TBDO\ de\ 4\ bandas\ (TBDO_4b) = \mathrm{b1}((1/\mathrm{b2}) - (1/\mathrm{b3}) - (1/\mathrm{b4})) \tag{6}$$

$$Baseline\ (línea\ base)(LB) = 0{,}5(\mathrm{b1} + \mathrm{b2}) - \mathrm{b3} \tag{7}$$

3. RESULTADOS

3.1. Análisis de la respuesta espectral

3.1.1. Influencia de la corrección atmosférica

En la figura 2 se muestra, a modo de ejemplo, las curvas de reflectividad de las clases de *Posidonia oceanica* y fondo sedimentario para una de las tres imágenes utilizadas en el estudio, corregidas atmosféricamente con C2RCC y sen2cor. Las correcciones C2RCC y C2X-Nets dan los mismos valores de reflectividad al aplicarlas sobre las tres imágenes de estudio. Esta falta de diferencias significativas entre ambas correcciones puede asociarse al hecho de que la zona de Jávea no sea una zona de agua continental dulce con elevada carga orgánica, tipo de agua al cual se le aplica normalmente el tipo de corrección C2XNets. No obstante, no se descarta que esta corrección pueda ofrecer datos de interés en la detección de *P. oceanica* de otras zonas marinas y/o fechas, donde las aguas sean más turbias por diferentes causas.

En la comparación entre los espectros de las correcciones C2RCC/C2X-Nets y los de Sen2cor sí encontramos diferencias, detectando las más significativas en la región del visible e infrarrojo cercano, desde los 400 hasta los 1000 nm aproximadamente. En las longitudes de onda más cortas (400-500 nm) la reflectividad de *P. oceanica* y fondo sedimentario alcanzan valores máximos en la corrección C2RCC de las tres imágenes, fenómeno que no se observa en las curvas de reflectividad de las imágenes corregidas con Sen2cor. Este máximo de reflectividad supera el valor de 0,12, llegando a alcanzar valores de 0,16 en el caso de la imagen del 12 de noviembre. En las longitudes de onda más largas de la región del visible (entre 500-700 nm) la curva de reflectividad cae bruscamente hasta alcanzar valores de 0,04, al igual que en la región del infrarrojo cercano, lo que resulta coherente teniendo en cuenta la mayor absorción de la radiación por el agua en esta región del espectro.

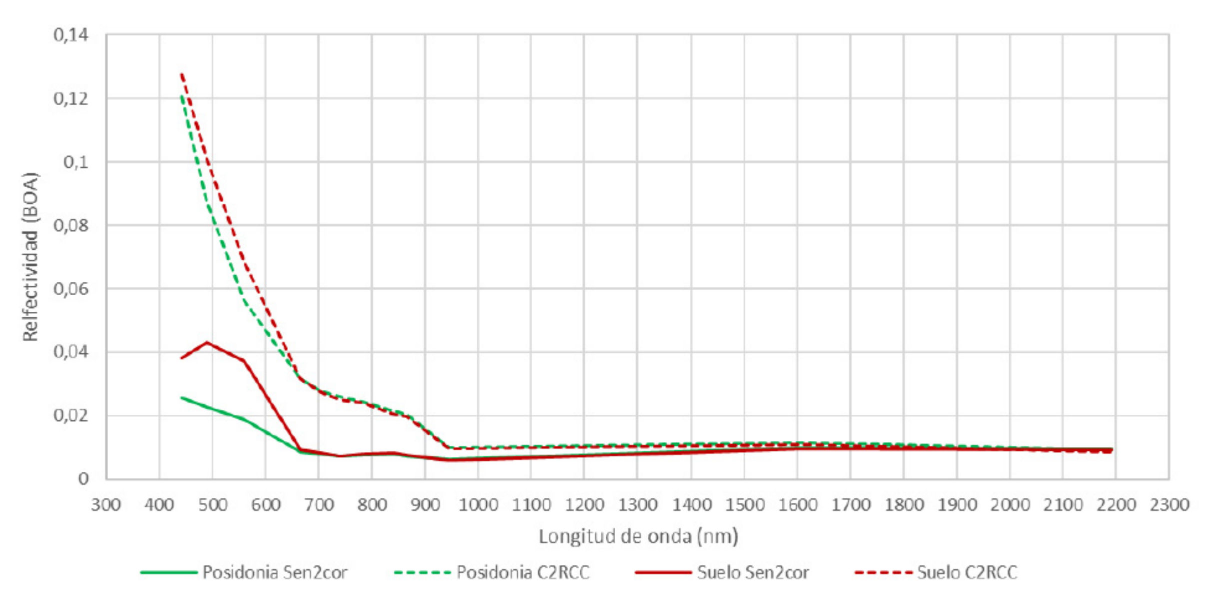


Figura 2. Influencia de la corrección en la imagen de Jávea del 17-03-19.

A partir de los 700 nm las curvas de reflectancia de las dos correcciones presentan diferencias menos significativas. No obstante, se aprecia como en las longitudes de onda del infrarrojo cercano entre los 700-1000 nm los valores de reflectividad de Sen2cor quedan por debajo de los de C2RCC, efecto también común para las 3 fechas escogidas. A partir de los 1000 nm los espectros de reflectividad de las correcciones C2RCC y Sen2cor coinciden, tanto en la clase de *P. oceanica* como en la clase de fondo, dando valores de reflectancia muy cercanos a 0.

Por todo lo anterior, se descarta la utilidad de las correcciones C2RCC o C2X-Nets al mostrar diferencias mínimas que no permiten la diferenciación de ambas clases a partir de un índice espectral. Consiguientemente, se considera la corrección Sen2cor como la apropiada para este estudio, ya que muestra diferencias más significativas entre los espectros de reflectancia de las clases de *P. oceanica* y fondo sedimentario hasta los 700 nm.

Estas diferencias son de un orden similar en las imágenes de marzo y abril, mostrando en ambos casos

valores de reflectancia más altos en la clase de fondo sedimentario que en la de *Posidonia oceanica*, como ocurre con la vegetación en tierra, incluso en la longitud de onda del color verde donde se esperaba tener valores más altos en la clase de *P. oceanica*. En consecuencia, se sugiere que la región entre 450 y 650 nm es la más interesante para la definición de un índice espectral de detección y diferenciación de las dos clases.

3.1.2. Influencia de la profundidad

En la figura 3 se muestran las curvas de reflectividad de las clases de *Posidonia oceanica* y fondo sedimentario extraídas para la imagen de marzo de 2019, corregida atmosféricamente con Sen2cor a dos profundidades diferentes. En esta se observa que las diferencias entre los espectros de *P. oceanica* y fondo sedimentario son más notorias en los píxeles de 5-10 metros de profundidad frente a los del rango de 10-15 metros, donde los espectros de ambas clases están más próximos entre sí. Este efecto se observa también en la imagen seleccionada de abril.

En referencia a la diferencia entre las clases, se observa como los valores de reflectividad son mayores para la clase de fondo sedimentario, tanto en los espectros de 5-10 metros de profundidad como en los de 10-15 metros. Otra diferencia detectada en los dos rangos de profundidad es la presencia de un pico de reflectividad en los 500 nm en la clase suelo, precedido de una ligera subida desde los 400 nm y una posterior bajada brusca hasta los 650 nm aproximadamente, que no se observa en la clase *P. oceanica.* Esta descripción se ve más marcada en los espectros de menor profundidad, donde se insinúa que el efecto de la columna de agua es menor. Esto sugiere que a mayor profundidad se obtienen valores de reflectividad menores, pero sin perder la forma de la curva espectral del fondo sedimentario descrita anteriormente. Para el caso de la *Posidonia oceanica*, en los dos rangos de profundidad se observa una bajada progresiva de la reflectividad desde los 450 nm hasta los 650 nm, tanto en la imagen de marzo como en la de abril.

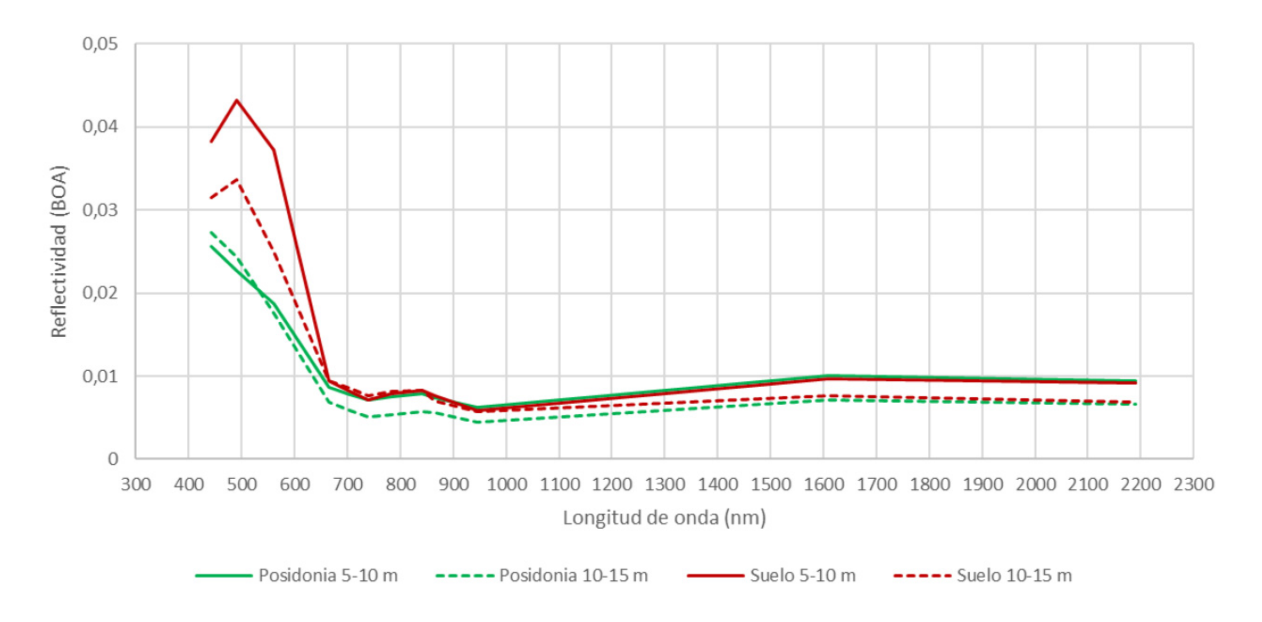


Figura 3. Influencia de la profundidad en la imagen de Jávea del 17-03-19.

Entre los 600-700 nm, las curvas espectrales en ambas fechas sufren pequeñas oscilaciones que posteriormente se estabilizan en el resto de longitudes de onda mayores. No obstante, aunque existen diferencias entre los valores de reflectividad para ambos rangos de profundidad, no son las mismas en las dos imágenes empleadas. Por ejemplo, en la imagen de marzo la reflectividad de la *Posidonia oceanica* a 5-10 metros es mayor, mientras que en la de abril es menor que la de 10-15 metros. Esto último sugiere que la profundidad no afecta de una manera determinada en la reflectividad de la *Posidonia oceanica* y que la influencia más notoria puede venir de parte de otras variables como la transparencia/turbidez del agua. Probablemente para este caso de la zona de estudio de Jávea, las aguas cristalinas hacen que la profundidad no resulte un factor determinante en la detección de las praderas hasta los 10 metros de profundidad.

A partir de los 700 nm se cuestiona la utilidad de los espectros para la detección de *Posidonia*, debido a que no existen diferencias significativas que permitan separar las clases. Además, las curvas presentan comportamientos diferentes entre las imágenes de marzo y abril. En la imagen de abril, a partir de los 700

nm, la curva de reflectividad de la clase suelo pasa de estar por encima de la clase *P. oceanica*, mientras que en el caso de la imagen de marzo, aunque la curva espectral de la clase suelo cae hasta valores de reflectividad cercanos a los de la clase *P.oceanica*, no llega a estar por debajo de esta. Todo ello hace que se descarte el uso de esta región del espectro para el estudio de índices espectrales de detección de la fanerógama.

3.1.3. Diferencias temporales

Haciendo referencia únicamente a las imágenes de marzo y abril, parece que la fecha no tiene una influencia significativa sobre la respuesta espectral de la *P. oceanica* ni del fondo sedimentario. En este análisis temporal, la forma de la curva es similar para las fechas de marzo y abril escogidas, aunque se detectan valores de reflectividad mayores en el caso de las curvas de abril. No obstante, resultaría conveniente extraer los espectros de otras imágenes de fechas correspondientes a otras estaciones del año, con diferente ángulo de elevación del Sol y donde, además, la *P. oceanica* puede sufrir cambios que se vean reflejados en su signatura espectral y pueda observarse su influencia. Este análisis supone únicamente una primera aproximación temporal, que debería retomarse en un estudio más exhaustivo que permita obtener conclusiones más robustas.

3.2. Definición de índices espectrales

En la figura 4 se representa la media de los espectros de los píxeles seleccionados para cada una de las distintas coberturas de *P. oceanica* escogidas entre 0 y 100 % en la imagen de fecha 17- 03-2019 en la zona de Segon Muntanyar. Se aprecia como todos los espectros se encuentran ordenados, teniendo el espectro de 0 % de cobertura de *P. oceanica* los valores máximos de reflectividad y descendiendo conforme aumenta la cobertura de *P. oceanica* hasta la curva de 100%, donde se obtienen los valores mínimos de reflectividad. A partir de los 650 nm las curvas de todos los espectros se solapan, por lo que la propuesta de índices espectrales se basa en el uso de aquellas bandas que abarcan las longitudes de onda entre los 400-600 nm. Teniendo en cuenta esto, se han probado varios índices usando distintas combinaciones de las bandas 1, 2 y 3 de sensor MSI a bordo de Sentinel-2 sensibles a las longitudes de onda 443, 490 y 560 nm. Finalmente, se propone un índice espectral (ecuación 8) empleando las bandas 1 y 3 que alcanza un valor R^2 de 0,9951, con el que se puede calcular el valor de la cobertura de *P. oceanica*:

$$FCP = 518{,}64((\mathrm{R443} - \mathrm{R560})/(\mathrm{R443} + \mathrm{R560})) - 10{,}026 \quad (8)$$

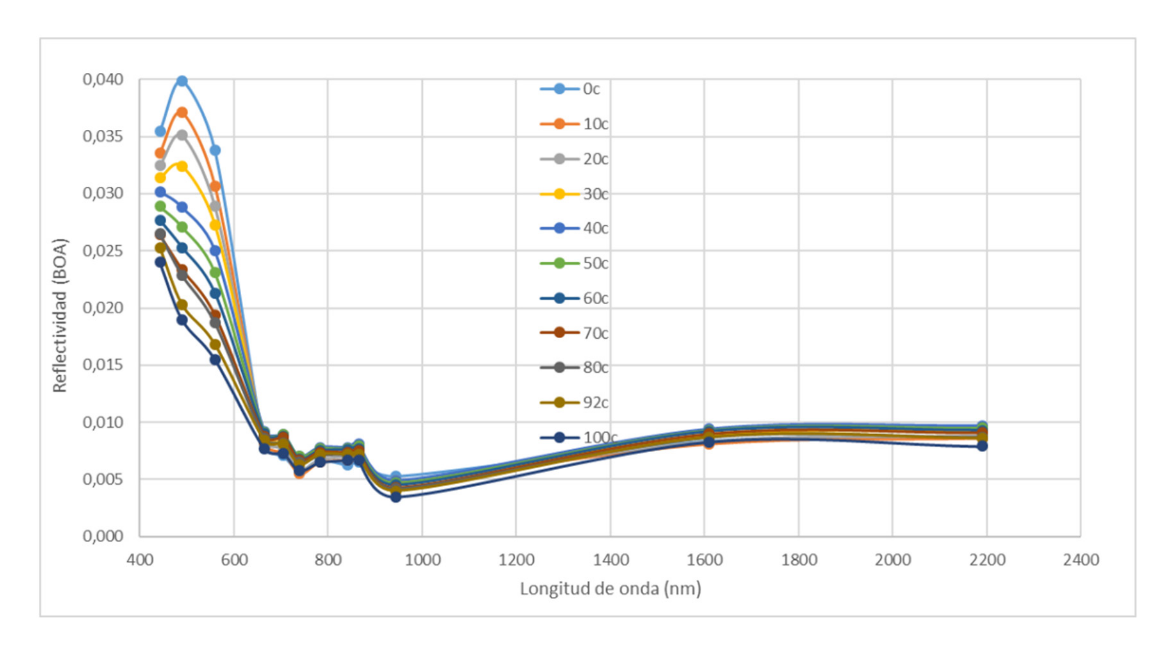


Figura 4. Curvas de reflectividad para las coberturas de *Posidonia oceanica* para distintos FCP de 0 a 100 %.

Para la validación del índice, se ha aplicado la fórmula 8 sobre varias zonas con cartografía conocida en las tres fechas seleccionadas. Se seleccionaron aleatoriamente 36 píxeles en 4 praderas distintas para el estudio espacial con diferente cobertura y se compara el valor del índice con el valor de fracción de cobertura real previamente calculado. Además, se seleccionaron 15 píxeles en la zona de la pradera de la playa de Segon

Muntanyar en las imágenes de las 3 fechas para realizar el estudio de validación temporal. Como resultado, se ha obtenido que, de los 36 píxeles escogidos para el estudio espacial, 11 no obtienen un valor del índice coherente con la fracción de cobertura de *P. oceanica* correspondiente, lo que supone que el 69,4% de los píxeles aciertan en la detección de *Posidonia oceanica*.

En la validación temporal, 27 de los 45 píxeles escogidos aciertan en el valor del índice de cobertura respecto al porcentaje real de *P. oceanica*, suponiendo un acierto de un 60%. Ambos porcentajes suponen un éxito de acierto medio. No obstante, si nos basamos en la comparación visual entre la cartografía verdad-terreno y la extensión de las praderas detectadas por a partir de la imagen (Figura 5), se aprecia que el índice consigue identificar la extensión de las praderas más densas. Es cierto que el índice no consigue definir con exactitud los límites de las praderas debido a la influencia del píxel de borde, lo que también provoca falsas detecciones en algunas regiones del interior de las praderas. Aun así, puede valorarse como una buena opción para cartografiar praderas de *Posidonia oceanica.*

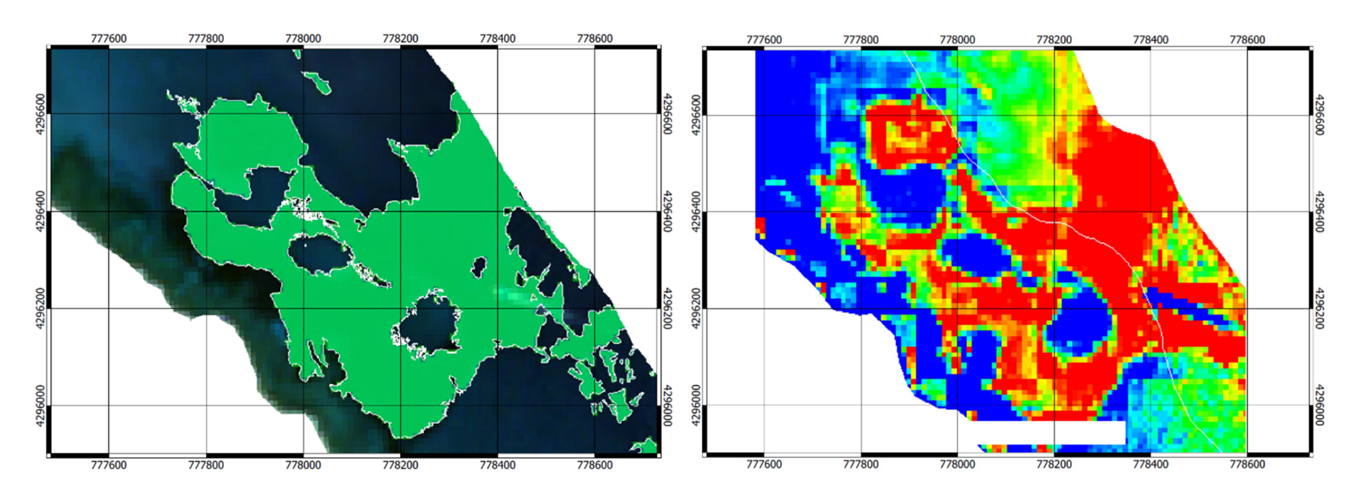


Figura 5. Ejemplo de la cartografía de *Posidonia oceanica* de la zona de Segon Muntanyar. El mapa de la izquierda se haobtenido por la técnica tradicional de sonar de barrido lateral, con las praderas destacadas en verde y el mapa de la derecha representa la cartografía extraída por satélite a partir de la fórmula 8, con las praderas destacadas en color rojo. La línea blanca representa la isobata de 10 m.

En las tres zonas de pradera densa escogidas para el análisis (Segon Muntanyar, Caleta de fora i Caleta de dins) se aprecia una similitud entre la cartografía realizada por sonar de barrido lateral y cámara remolcada, con las praderas de *Posidonia oceanica* marcadas y delimitadas en polígonos de color verde, y la cartografía extraída a partir del índice aplicado a la imagen de satélite, con los píxeles de alta probabilidad de praderas de *P. oceanica* resaltados en color rojo. En algunas zonas se identifican errores claros de detección de *P. oceanica*, como es el caso de la línea de costa (Figura 3) donde aparecen varios píxeles con valores del índice entre 10-80. También se aprecia en la imagen un error de detección producido por la afección de una nube en el margen derecho, la cual se traduce en valores negativos del índice en la cartografía derivada de la imagen de satélite.

Por otro lado, se aprecian falsas detecciones en las zonas de mayor profundad destacadas de color verde intenso. La línea de color blanco que atraviesa la imagen corresponde a la isobata de 10 metros de profundidad. En todas las imágenes se observa como la detección de *P. oceanica* se vuelve más difusa a partir de esta profundidad, incorporando valores positivos del índice alrededor de las praderas. No obstante, la mayoría de valores son inferiores a los de *P. oceanica*, por lo que el rango de valores/colores permite detectar estas falsas detecciones con facilidad. Este efecto se observa en el margen superior e inferior derecho de la figura 5.

Para tratar de mejorar la capacidad de predicción del índice calibrado en la fórmula 8 y con el fin de buscar un índice más genérico, se han extraído todos los espectros de los píxeles empleados en la calibración y validación (36 + 45 + 10), probando todas las combinaciones posibles de los diferentes índices mostrados en las fórmulas 1-7. En total se cruzan 91 espectros con su correspondiente fracción de cobertura de *P. oceanica*. Sin embargo, al introducir los 91 valores en ARTMO, todos los índices y combinaciones de bandas arrojan valores de $R^2 < 0,4$ por lo que no se obtuvo ningún resultado aceptable. Posteriormente, se probaron todos los índices y todas las combinaciones de bandas con los datos únicamente de 0 a 10 m de profundidad (45 datos), obteniendo una buena correlación ($R^2 > 0,76$) con la combinación de bandas 945, 443 y 1.610 nm

en el índice LB (ecuación 7). Por tanto, se propone como un método adecuado para cartografiar la *P. oceanica* en la zona de estudio, pero solo válido para profundidades entre 0 y 10 m, utilizando la ecuación:

$$FCP(\%) = 160{,}83 - 13463\ [0{,}5(\mathrm{R945} + \mathrm{R443}) - \mathrm{R1610})] \quad (9)$$

La determinación de la ecuación 9 ha sido obtenida con ARTMO mediante validación cruzada, por lo que se entiende que han sido tenidos en cuenta los procesos de calibración y validación con la base de datos utilizada. Dicha ecuación nos permite obtener una información cuantitativa del porcentaje de suelo marino cubierto por *P. oceanica*, con un RMSE de 19 %, bastante aceptable para estudios de teledetección, y con la única limitación de que solo es válido en aguas con menos de 10 m de profundidad. Sin embargo, el método permite hacer el seguimiento temporal de la costa de Jávea y proporciona una herramienta adecuada para el cartografiado y análisis multitemporal de las praderas de *P. oceanica* de la zona, con la ventaja de que, al ser una variable cuantitativa, permite calcular la cobertura total de una determinada zona y hacer una estimación de la biomasa de *P. oceanica* disponible.

4. CONCLUSIONES

Una vez analizadas todas las variables que pueden afectar a la detección de *Posidonia oceanica* por teledetección (corrección atmosférica, profundidad y fecha de obtención de las imágenes) se ha confirmado que afectan significativamente a las respuestas espectrales de cada clase. El análisis para la elección del tipo de corrección atmosférica demuestra que la aplicación de distintos tipos de corrección ofrece resultados diferentes para Sen2cor pero iguales en el caso de C2RCC y C2X-Nets. Se ha determinado que la corrección más adecuada para la detección de *P. oceanica* es Sen2cor debido a que proporciona mayores diferencias entre las signaturas espectrales de las clases de fondo con suelo desnudo y *Posidonia oceánica.*

Los resultados indican que la profundidad también afecta. A partir de los 10 metros la detección se dificulta por la bajada en los valores de reflectividad y por encima de los 15 metros la detección es mucho más complicada. Se concluye que a partir de esta profundidad las técnicas de teledetección no permiten la identificación de *P. oceanica* y diferenciarla del fondo sedimentario. Estos resultados coinciden con los obtenidos en otros sectores de la costa alicantina a partir de imágenes SPOT (Candelas y López Garcia, 2014).

El análisis espectral ha permitido determinar la zona espectral de interés para la propuesta de índices espectrales para la detección de *Posidonia oceanica* es la región del visible, desde los 450 hasta los 650 nm, donde se encuentran las mayores diferencias entre las clases de *P. oceanica* y fondo.Se ha propuesto un índice a partir de la combinación de tres bandas de Sentinel-2 con corrección atmosférica Sen2cor, que permite cartografiar una nueva variable biofísica, definida como fracción de cobertura de *P. oceanica* y que posibilita generar mapas de la costa de Jávea, pero solo a profundidades inferiores a 10 m. A mayores profundidades, se producen falsas detecciones y no es posible diferenciar los suelos desnudos y las praderas. No obstante, el método permite una primera detección de las praderas que posteriormente puede mejorar con la aplicación de otras técnicas en campo, permitiendo un ahorro de costes.

Como futuras líneas de investigación se propone realizar mediciones con radiómetros en campo que permitan conocer mejor la respuesta espectral de la *P. oceanica* a diferentes profundidades y con ello entrenar modelos más robustos para una generalización del método. Testear el índice en más imágenes y zonas mejoraría su grado de validez, ya que la aplicación sobre únicamente 3 imágenes no es suficiente para ratificar los resultados en este estudio. Por último, sería interesante probar la aplicación del índice en imágenes de otros sensores de mayor resolución espacial y en otras zonas diferentes.

En definitiva, los resultados del presente estudio confirman que las imágenes ópticas de Sentinel-2 son útiles en la obtención de información sobre la distribución espacial de hábitats costeros de *P. oceanica.* Con su resolución espacial de 10 metros, su periodo de revisita de 5 días y su política de datos abiertos, resulta de especial interés en zonas con datos de baja calidad y/o zonas remotas con grandes huecos de información. El hecho de ser una herramienta que ofrece datos de forma retrospectiva, rápida y no invasiva la convierte en un aliado crucial para la conservación y gestión de hábitats costeros a nivel global.

Al igual que otros estudios ya publicados, este demuestra que la teledetección es una herramienta útil para este tipo de tareas, mostrando la novedad de fundamentarse en la búsqueda de un índice espectral y no en técnicas de clasificación, método más empleado hasta el momento para los estudios de *P. oceanica*.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es el fruto de la colaboración entre GAMASER Globalomnium y los departamentos de Geografía y Física de la Tierra y Termodinámica de la Universitat de València.

Los autores desean dar las gracias a la Fundación oceanogràfic, en especial a Paco Torner, por darnos la mano en este proyecto y compartir el conocimiento de campañas y datos de campo de valor incalculable para este trabajo.

Por último, gracias a toda el área de medio marino, del departamento de consultoría medioambiental de GAMASER Global Omnium, por apostar desde el primer momento en la realización de todo el proyecto, poniendo a disposición del estudio todos los medios para que esta idea se hiciera realidad.

5. BIBLIOGRAFÍA

Bonin-Font, F., Massot, M., Oliver, G. (2016). Towards Visual Detection, Mapping and Quantification of Posidonia Oceanica using a Lightweight AUV. *IFAC – PapersOnline, 49* (23), 500–505. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.485

Brockmann, C., Doerffer, R., Peters, M., Kerstin, S., Embacher, S., Ruescas, A. (2016). Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. In Proceedings of the "ESA Living Planet Symposium 2016", Prague, Czech Republic, 9-13 May 2016.

Candelas, F.M. y López García, M.J. (2014) Cartografía de praderas de Posidonia Oceanica en el litoral valenciano a partir de imágenes SPOT-5. En: Zaragozí, B. y Ramón, A. (coords.) *Tecnologías de la información para nuevas formas de ver el territorio*, Asociación de Geógrafos Españoles, Alicante, pp. 431-437. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5425057

Fornes, A., Basterretxea, G., Orfila, A., Jordi, A., Alvarez, A., Tintore, J. (2006). Mapping *Posidonia oceanica* from IKONOS. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 60*, 315-322. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.04.002

Pu, R., Bell, S., Meyer, C., Baggett, L., Zhao, Y. (2012). Mapping and assessing seagrass along the western coast of Florida using Landsat TM and EO-1 ALI/Hyperion imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 115*, 234-245. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.09.006

Poursanidis, D., Traganos, D., Reinartz, P., Chrysoulakis, N. (2019). On the use of Sentinel-2 for coastal habitat mapping and satellite-derived bathymetry estimation using downscaled coastal aerosol band. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation, 80*, 58-70. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.012

Pasqualotto, N., Delegido, J., Van Wittenberghe, S., Rinaldi, M., Moreno, J. (2019). Multi-crop green LAI estimation with a new simple Sentinel-2 LAI Index (SeLI). *Sensors, 19*, 904.

Ruiz, J.M., Guillén, J.E., Ramos Segura, A. y Otero, M.M. (Eds.). 2015. *Atlas de las praderas marinas de España*. IEO/IEL/ UICN, Murcia-Alicante-Málaga, 681 pp.

Verrelst, J., Rivera, J.P., Alonso, L., Moreno, J. (2011) ARTMO: An Automated Radiative Transfer Models Operator toolbox for automated retrieval of biophysical parameters through model inversion. In Proceedings of the EARSeL 7th SIG-Imaging Spectroscopy Workshop, Edinburgh, UK, 11–13 April 2011; pp. 11–13.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 296-305

Una herramienta SIG de apoyo a la planificación de alternativas al abandono en regadíos tradicionales de ribera

M. Guillén Castillo[1], Mª A. Casterad Seral[1], I. Mantero Ruiz[3], R. Salvador Esteban[1,2]

[1] Departamento de Sistemas Agrícolas, Forestales y Medio Ambiente (Unidad asociada a EEAD-CSIC Suelos y Riegos), Avda. Montañana 930, 50059-Zaragoza, España.
[2] Instituto Agroalimentario de Aragón-IA2 (CITA-Universidad de Zaragoza), Zaragoza, España.
[3] Cordero Software

mguillenc@cita-aragon.es , acasterad@cita-aragon.es, nacho@corderosoftware.es, rsalvadore@cita-aragon.es

RESUMEN:
El sector agrícola tiene una gran importancia en la provincia de Teruel, pero el abandono de la actividad agraria, asociado a la despoblación, es uno de los grandes retos a los que se enfrenta. Los regadíos de ribera turolenses sufren este proceso de abandono que se agrava año tras año. Proporcionar alternativas productivas y/o medioambientales al abandono de parcelas en estos regadíos que contribuyan a dinamizar la economía local y a poner en valor los agroecosistemas de estas zonas, es la propuesta realizada desde el proyecto RegATeA. La gran superficie y número de parcelas abandonadas a considerar, hace necesario contar con una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, RegATeA-Plan (versión alfa) que se presenta en este trabajo. Esta herramienta ayuda a seleccionar dentro de una lista de posibles alternativas productivas, medioambientales o recreativas, aquellas que son viables para cada parcela objeto de actuación, en función de distintas variables. Las variables consideradas están basadas en requisitos del cultivo, datos de suelo, climatología, y factores medioambientales. RegATeA-Plan se compone de una base de datos con información de las parcelas a estudiar, un sistema experto, que busca la solución óptima, y un visualizador SIG que ayuda a representar y editar la mejor solución. En esta aplicación web se generan distintos escenarios para la obtención de las diferentes combinaciones de alternativas. La versión alfa de la herramienta SIG que se ha desarrollado en este proyecto ha demostrado ser útil y amigable desde el punto de vista del usuario. Está previsto, en un futuro próximo, su mejora incorporando nuevas utilidades que cubran las necesidades de los diferentes usuarios finales.

Palabras-clave: sistema experto, aAbandono, Planes de Actuación, Agroecosistemas de ribera.

1. INTRODUCCIÓN

El sector agrícola tiene una gran importancia en la provincia de Teruel, pero el abandono de la actividad agraria, asociado a la despoblación, produce un deterioro de los agroecosistemas de ribera y una pérdida de la capacidad productiva de la zona. Los regadíos de ribera turolenses sufren este proceso de abandono que se agrava año tras año y es uno de los grandes retos a los que se enfrenta esta provincia.

El primer paso para buscar soluciones es conocer y caracterizar en profundidad la zona que presenta dichos problemas. Con este objetivo inicial comenzó el proyecto RegATeA, que tiene como finalidad proporcionar alternativas productivas, recreativas y/o medioambientales al abandono de parcelas en estos regadíos que contribuyan a dinamizar la economía local y a poner en valor los agroecosistemas de estas zonas (https://regatea.cita-aragon.es/).

El objetivo final del proyecto RegATeA fue la propuesta de alternativas viables en parcelas abandonadas mediante la combinación de los requisitos necesarios para llevar a cabo cada alternativa y las características particulares de cada zona. La gran superficie y número de parcelas abandonadas (sin manejo productivo) a considerar, hizo necesario contar con una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, RegATeA-Plan. Con esta herramienta se proponen las alternativas productivas, recreativas y medioambientales viables en cada parcela de forma que el gestor o usuario del programa tenga a su disposición de forma gráfica toda la información necesaria para la creación de distintos escenarios posibles.

Hay que tener en cuenta que para la asignación de dichas alternativas como viables en cada parcela se

evalúan los datos climáticos, edafológicos y de localización de cada una de las ellas. Para la asignación de estas características y la posterior visualización y evaluación de los resultados parciales y finales son necesarios los SIG. Además, es necesaria una visión global de la zona para poder elegir las alternativas más adecuadas dentro del conjunto de parcelas estudiadas, considerando también las alternativas viables en parcelas cercanas y colindantes, de forma que se puedan crear escenarios factibles de asignación de alternativas en cada zona piloto. La utilidad de herramientas SIG para el análisis de la distribución, evolución y caracterización de zonas de cultivo abandonas ha quedado ampliamente demostrada por diversos autores como Alonso et al. (2015), Rodríguez y Romero (2016), Portalés-Julià (2021), Morell-Monzó et al. (2022).

Los Sistemas Expertos (SE) se adaptan perfectamente a las necesidades planteadas, y aunque no existe demasiada información sobre el uso de estos sistemas para el objetivo de este trabajo, si existen para responder a diversas problemáticas y ámbitos de la agricultura como pueden ser: optimizar el uso de recursos y maximizar la producción de alimentos (Abdelhamid et al., 1997), manejo de plantaciones (Guha y Guha, 1999), diseño de rotaciones de cultivos en un invernadero (Rafael-Pérez et al., 2019), y optimizar el control de plagas y enfermedades (Yaya-Lévano et al., 2020).

En esta comunicación, se va a detallar el proceso de desarrollo de la herramienta RegATeA-Plan desde el diseño hasta un pequeño ejemplo de escenario de alternativas para los regadíos tradicionales de ribera de los ríos Martín y Guadalope en Teruel. Estos procesos van a explicarse desde el punto de vista del experto y del usuario final. Ambos actores interactúan con el desarrollador constantemente durante el proceso, tanto proporcionando el diseño inicial, como corrigiendo, modificando e intercambiando ideas durante todo el desarrollo de la herramienta y posterior puesta en marcha.

2. METODOLOGÍA: DESARROLLO DEL SOFTWARE REGATEA-PLAN

2.1. Desarrollo conceptual

El software RegATeA-Plan está basado en un Sistema Experto (SE) en lenguaje CLIPS, que facilita un entorno para el desarrollo, producción y ejecución de sistemas expertos basados en reglas y/o objetos.

Un SE es un sistema que proporciona respuestas sobre una problemática específica al hacer deducciones semejantes a las que haría un experto sobre el problema y que se basa en los conocimientos obtenidos previamente por ellos. Tiene la capacidad de explicar al usuario el razonamiento seguido y las conclusiones a las que ha llegado. Su finalidad es proporcionar apoyo a la toma de decisiones a los usuarios finales.

Un SE se compone de tres partes fundamentalmente (Figura 1):

- Base de conocimiento: es la base de datos de información que el sistema necesita. Esta información consta tanto de la base de datos global, que incluye los datos conocidos como hechos, como de las reglas que rigen las relaciones entre los datos.
- Motor de inferencia: es el componente del sistema que utiliza la base conocimiento para encontrar la mejor solución posible para el problema estudiado. Aplica las reglas a los hechos conocidos para inferir nuevos hechos.
- Interfaz de usuario: es la parte con la que interactúa el usuario. El usuario realiza una consulta que pasa al motor de inferencia y posteriormente muestra los resultados junto con el razonamiento seguido al usuario.

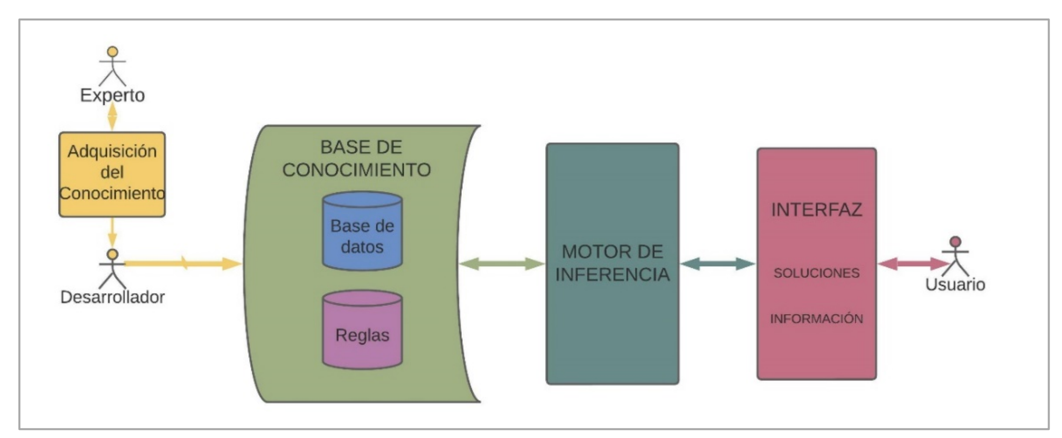


Figura 1. Esquema de composición de un sistema experto.

La finalidad, en el caso que nos ocupa, fue facilitar el trabajo de plantear alternativas viables al abandono de parcelas. Este trabajo podía ser largo y tedioso debido a la gran superficie y el número de parcelas y alternativas a considerar.

2.2. Base de conocimiento

2.1.1. Base de Datos

La base de datos global del software desarrollado es una base de datos relacional que consta de varias tablas, unas que caracterizan a las parcelas sin manejo productivo localizadas en el proyecto RegATeA y otras que caracterizan las alternativas que se plantean dentro del proyecto para evitar el abandono de los regadíos de ribera. La tabla de parcelas (TP) nos da información sobre su localización y factores que dependen de ella y sus características edafológicas. En la Tabla 1 se pueden ver las diferentes atributos o variables que componen esta tabla.

Tabla 1. Atributos que componen la tabla Parcelas. Los atributos de color azul corresponden a datos relacionados con la localización, color marrón con edafología, rojo con disponibilidad de riego y verde con climatología.

Atributo	Descripción	Tipo de atributo	Origen de Datos
REFCAT	Referencia Catastral	Texto	Catastro
COORDX	Coordenada X del centroide de la parcela	Numérica (decimal)	Inventario Parcelas Abandonadas
COORDY	Coordenada Y del centroide de la parcela	Numérica (decimal)	Inventario Parcelas Abandonadas
COMARCA	Nombre de la Comarca a la que pertenece	Texto	Inventario Parcelas Abandonadas
C_COMARCA	Código de la Comarca a la que pertenece	Numérica (entero)	Inventario Parcelas Abandonadas
MUNICIPIO	Nombre del Municipio al que pertenece	Texto	Inventario Parcelas Abandonadas
CCMUNI	Código del Municipio al que pertenece	Numérica (entero)	Inventario Parcelas Abandonadas
DIST_NU_m	Cercanía a un núcleo urbano en m.	Ordinal (Texto) Cerca, Medio, Lejos	Inventario Parcelas Abandonadas
N_NU	Nombre del núcleo urbano más cercano	Texto	Inventario Parcelas Abandonadas
INUNDABLE	Parcela dentro de un polígono de inundación con periodo de retorno de 10 años	Binaria (Texto) Si/No	Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico
pH	Valor del pH asignado a la parcela	Numérica (decimal)	Interpolación análisis de suelo
TEXTURA	Valor de la textura asignado a la parcela	Numérica (entero) 1-11 (clases texturales USDA)	Interpolación análisis de suelo
MO	Valor de la materia orgánica en % asignado a la parcela	Ordinal (Texto) Pobre, Medio, Rico	Interpolación análisis de suelo
SALINIDAD_DS_M	Valor de la salinidad en dS/m asignado a la parcela	Numérica (decimal)	Interpolación análisis de suelo
RIEGO	¿Tiene Riego la Parcela?	Binaria (Texto) Si/No	No disponible por el momento
ID_Clima	ID_de la estación Climática más cercana	Texto	AEMET/SIAR

Todos los atributos referentes a la localización de las parcelas se han derivado del inventario de parcelas sin manejo productivo obtenido en el proyecto RegATeA con teledetección. Dada la utilidad de las imágenes de satélite para la identificación de superficies abandonadas puesta de manifiesto por diferentes autores como Vidal-Macua et al. (2018) y Portalés-Julià et al. (2021), se apostó por utilizar las imágenes Sentinel 2 para este fin. Las parcelas sin manejo productivo se localizaron mediante clasificación supervisada con el algoritmo de aprendizaje automático Support Vector Machine Radial, utilizando diferentes variables derivadas de dichas imágenes (índices de vegetación, suelo, humedad y características texturales), y la aplicación

de reglas de decisión (Guillén et al., 2022). En este inventario, además de los atributos utilizados en esta base de datos, existe información hidrológica (cuenca, subcuenca y río al que pertenece) y de geometría (área de la parcela, área que pertenece al regadío tradicional de ribera, porcentaje de la superficie de la parcela que está sin manejo productivo, porcentaje de la superficie de la parcela que está con manejo productivo y porcentaje de la superficie de la parcela que corresponde a espacios que no son agroforestales). Toda esta información puede ser consultada y descargada en https://citarea.cita-aragon.es/citarea/handle/10532/5765.

En los atributos relacionados con la localización de la parcela se ha incluido información sobre la inundabilidad de la misma. Así, se define la parcela como inundable si lo es con un periodo de retorno de 10 años de acuerdo con datos de https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/zi-lamina.aspx (fecha de descarga: 31/01/2020).

La caracterización de los suelos del regadío de ribera de los ríos Martín y Guadalope se realizó como una actividad del proyecto. Dicha caracterización edafológica se derivó de un muestreo de suelos "*ad-hoc*" en 175 puntos (tasa de muestreo de 1 punto cada 46 ha) a lo largo de los regadíos tradicionales de ribera de cada uno de los ríos (https://citarea.cita-aragon.es/citarea/handle/10532/5808). En las muestras de suelo tomadas se analizaron las propiedades fisicoquímicas de los suelos (pH, materia orgánica, salinidad y textura). Los valores de las variables edáficas que se asignan a cada una de las parcelas de estudio se estimaron mediante interpolación espacial de los datos obtenidos en los 175 puntos de muestreo.

En cuanto al atributo riego, en esta versión de RegATeA-Plan se asignó a todas las parcelas el valor SI. Este campo se generó para poder distinguir las parcelas que pueden ser regadas en la actualidad de algunas parcelas a las que el abandono de las infraestructuras de riego ha dejado sin suministro de agua, aunque tengan derecho a ello. Actualmente este dato no se registra, aunque se espera que en un futuro se pueda conocer e incorporarlo a la base de datos.

Las características climatológicas de las parcelas se obtuvieron mediante la asignación a cada parcela de la información de una estación meteorológica cercana bien de la red SIAR (https://eportal.mapa.gob.es//websiar/Inicio.aspx), bien de la AEMET (http://www.aemet.es/es/datos_abiertos/AEMET_OpenData). Sólo se contemplaron para la asignación de alternativas los valores de temperatura media diaria y mínima absoluta, ya que resultan los más limitantes para la implantación de los distintos cultivos. La precipitación no resulta limitante en este caso ya que las parcelas contempladas son de regadío y por lo tanto disponen de aporte de agua asegurado. La TP está relacionada mediante el ID_Clima con la tabla que contiene la información climática (Tabla 2), clasificada por cada estación meteorológica, en la que se incluyen los valores diarios de Temperatura Mínima Absoluta (TMIN) y la Temperatura Media (TMED) de los años disponibles en cada una de las estaciones.

Tabla 2. Atributos que componen la tabla Clima

Atributo	Descripción	Tipo de atributo	*Origen de Datos*
ID_CLIMA	ID_de la estación climática	texto	AEMET/SIAR
DIA_JULIANO	Día juliano del año	Numérica (entero)	
TMIN	Temperatura mínima diaria (ºC)	número decimal	AEMET/SIAR
TMED	Temperatura media diaria (ºC)	número decimal	AEMET/SIAR

La tabla con información sobre las alternativas (TC) se basa en la caracterización de las necesidades y limitaciones de los diferentes cultivos teniendo en cuenta en este caso únicamente la opción de alternativas productivas (Martín, 2021). En el SE se contemplan alternativas medioambientales (bosque de ribera, zona de amortiguación de avenidas, reserva de especies locales…) y recreativas (merendero, zonas verdes, zonas recreativas infantiles, huertos escolares o sociales…) cuyas tablas de atributos se desarrollarán en futuras versiones del programa. En cuanto a la distribución y necesidades de cultivo de hortícolas locales y aromáticas, se realizó dentro del proyecto una recopilación de las especies de aromáticas más frecuentes en cada zona, así como de las características de cultivo y localización de cultivares locales de las hortícolas disponibles en el Banco de Germoplasma Hortícola de Zaragoza del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (https://bghz.cita-aragon.es/). Los requisitos de cada uno de los cultivos contemplados fueron la temperatura mínima y óptima de crecimiento, las texturas de suelo compatibles con un correcto desarrollo y valores límite de pH y salinidad del suelo, así como necesidades de materia orgánica del mismo. La relación de atributos, su descripción y origen de los datos puede consultarse en la Tabla 3.

Tabla 3. Atributos que componen la tabla de cultivos o alternativas productivas (TC)

Atributo	Descripción	Tipo de atributo	Origen de Datos
ALTERNATIVA	Nombre del cultivo a estudiar como alternativa	Texto	
DIA_INICIO	Día juliano inicio ciclo de cultivo	Numérica (entero)	Datos locales
DIA_FIN	Día juliano fin ciclo de cultivo	Numérica (entero)	Datos locales
C_COMARCA1 - C_COMARCA9	Código de Comarcas de las que se tienen semillas de cultivares locales en el Banco de Germoplasma Hortícola de Zaragoza o Teruel (BGHT).	Numérica (entero)	BGHZ, BGHT
RIEGO	Necesidad de riego	Binaria (texto: SI/NO)	Bibliografía
PH_MIN	pH min del suelo que tolera el cultivo	Numérica (decimal)	Bibliografía
PH_MAX	pH max del suelo que tolera el cultivo	Numérica (decimal)	Bibliografía
SALINIDAD	Salinidad máxima que tolera el cultivo	Numérica (decimal)	Bibliografía
TEXTURA1 - TEXTURA5	Texturas óptimas para crecimiento cultivo	Numérica (entero)	Bibliografía
T_MIN	Tª mínima en la que el cultivo sufre parada vegetativa o incluso la muerte	Numérica (decimal)	Bibliografía
T_OPTIMA1	Temperatura mínima óptima para el cultivo	Numérica (decimal)	Bibliografía
T_OPTIMA2	Temperatura máxima óptima para el cultivo	Numérica (decimal)	Bibliografía

2.1.2. *Reglas*

La otra parte que compone la base de conocimiento son las reglas que se van a contemplar para considerar una alternativa viable o no y que rigen el comportamiento del motor de inferencia. En la Tabla 4 se presenta un breve resumen de estas reglas.

Tabla 4. Resumen de las reglas y sus características

Atributo	Regla	SI	NO
Riego	Cultivos con necesidad de riego ¿Tiene riego la parcela?	Posible Viable	No Viable
pH	pH min cultivo < pH parcela < pH max cultivo	Posible Viable	No Viable
Textura	Textura suelo DENTRO DE Texturas aptas para el cultivo	Posible Viable	No Viable
Materia Orgánica	MO suelo > MO cultivo (categorizado)	Posible Viable	No Viable
CEe (dS/m)	CE parcela < CE límite cultivo	Posible Viable	No Viable
Tª MIN (ºC)	Tª mín diaria > Tª mín del cultivo 90% del ciclo del cultivo	Posible Viable	No Viable
Tª MED (ºC)	Tª med diaria > Tª óptima del cultivo 50% del ciclo del cultivo	Posible Viable	Posible limitante
Comarca	¿Existe registro de semilla del cultivo en la comarca en el BGHZ o BGHT?	A tener en cuenta	No limitante

La primera regla que se aplica identifica si la parcela se encuentra dentro de Zonas Inundables asociadas a periodos de retorno de 10 años, lo que lleva consigo una alta probabilidad de inundación. A estas parcelas se les asigna directamente la alternativa medioambiental, pensando en ellas como bosque de ribera o zona de amortiguación de avenidas, excluyendo el resto de alternativas automáticamente.

La siguiente regla que aplica identifica si la parcela se encuentra a menos de 200 m de un núcleo de

población, es decir que el atributo de cercanía al núcleo urbano tenga el valor “Cerca”. Si esto es así, la alternativa recreativa se asigna como viable, en caso contrario no se considera viable la opción de recreativa. Esta regla localiza las alternativas recreativas en zonas a menos de 200 m del núcleo urbano, buscando que las zonas de esparcimiento de una localidad se encuentren accesibles para toda la población

Las reglas restantes se aplican en la elección de alternativas productivas. Dentro de estas reglas, hay algunas que son limitantes, es decir, que si no se cumplen la alternativa se excluye como viable; y hay otras reglas que no son limitantes, sino que son meramente informativas y se deja en manos del usuario el que decida si la considera viable o no en una determinada parcela y escenario. Las reglas que se consideran limitantes son las relacionadas con la disponibilidad de riego, el pH, textura, salinidad y materia orgánica del suelo, además de la temperatura mínima de crecimiento. Sin embargo, son reglas no limitantes y meramente informativas las relacionadas con la temperatura óptima de crecimiento y la disponibilidad de cultivares de esa especie en el BGHZ o BGHT.

2.3. Motor de Inferencia

El motor de inferencia es la parte central del software, ya que relaciona los datos con las reglas introducidas y proporciona un resultado con la información que se necesita. En la herramienta desarrollada, el motor de inferencia relaciona todas las características de cada una de las parcelas almacenadas en la tabla de parcelas con las características de todas las alternativas introducidas y almacenadas en la tabla de alternativas. En un primer paso, el motor de inferencia genera una tabla con todas las alternativas óptimas para cada parcela, es decir, todas las alternativas que cumplen todas las reglas excluyentes. Posteriormente, el motor de inferencia compara cada una de las características de las parcelas con las alternativas y registra las alternativas que no cumplen cada una regla concreta.

2.4. Interfaz

El interfaz de la aplicación web ha sido diseñado en *Symfony* que se trata de un framework para desarrollo de aplicaciones web en lenguaje *PHP* con licencia de software libre. Está diseñado para utilizar el patrón de programación *Modelo Vista Controlador* que separa el código en tres capas:

- El Modelo: define la lógica del proyecto, la base de datos y lógica de negocio.
- La Vista: con lo que el usuario interactúa
- El Controlador: la pieza de código que llama al Modelo para obtener los datos que le pasa a la Vista para la presentación al usuario en una página *HTML 5*.

Para visualizar los mapas se integra dentro de *Symfony* la librería *Leaflet*, desarrollada en *Javascript* principalmente para mapas interactivos en dispositivos móviles o páginas web. *Leaflet* recupera la información SIG de un servidor de mapas donde se publica la capa que se va a visualizar en cada proyecto junto con la ortofotografía de la zona a estudiar. La dirección del servidor de mapas y la capa se configura al generar el proyecto para que la aplicación sepa dónde encontrarlo. La visualización de la ortofoto se obtiene de la capa *WMS* del servidor de mapas Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), recuperando las ultimas fotos disponibles.

3. RESULTADOS

El resultado que genera el motor de inferencia son varias tablas en las que, para cada parcela, se proporcionan las alternativas viables y, para cada una de las características de la parcela y su(s) regla(s), las alternativas que no la(s) han cumplido. De esta forma, se genera una información muy útil a todos los agentes implicados en el desarrollo y prueba del SE: al experto le facilita información sobre si es necesario modificar/incluir/eliminar alguna de las reglas por excesivamente limitante o demasiado permisiva; al desarrollador le proporciona información sobre el correcto funcionamiento del SE y al usuario sobre las alternativas que no pueden ser introducidas en la zonas de estudio y los motivos de su exclusión, además de las alternativas viables que se están buscando. Estos resultados puede visualizarlos el usuario a través de una aplicación web, para poder estudiar y analizar el reparto de las alternativas espacialmente.

En esta aplicación web se generan distintos escenarios para la obtención de las diferentes combinaciones de alternativas. Para ello, se introducen los datos generales en la base de datos del SE como son los cultivos y sus necesidades, el clima, etc., y se concretan los datos de cada escenario específico, como las parcelas y sus características. Esta información alimenta las reglas del sistema experto. Los resultados que arroja se muestran en el visor donde es posible trabajar directamente en las parcelas para, según el criterio

del usuario, redefinir las soluciones propuestas por el sistema experto y efectuar distintos planes de alternativas viables en una misma zona. Para facilitar la interpretación, a cada alternativa se le ha asignado un color, de forma que cuando muestre la solución sobre el parcelario, lo hará rellenando el polígono de la parcela de dicho color a la vez que se puede consultar la leyenda. Los ejemplos que se presentan en las Figuras 2-5 pertenecen a una zona del municipio de Calanda.

El primer resultado que se genera es la conclusión alcanzada por el motor de inferencia (Figura 2). En esta conclusión pueden aparecer las siguientes soluciones:

- Solo hay una alternativa posible para una parcela: se asignará dicha alternativa rellenando el polígono de parcela con el color elegido para la alternativa y la línea del contorno será de tipo discontinua.
- No encuentra ninguna alternativa viable: se quedarán sin asignar y rellenará el polígono de parcela con color blanco y la línea del contorno será de tipo discontinua.
- Si tiene varias alternativas posibles, no asignará ninguna alternativa rellenando el polígono de parcela con color azul transparente y la línea en azul de tipo continua.

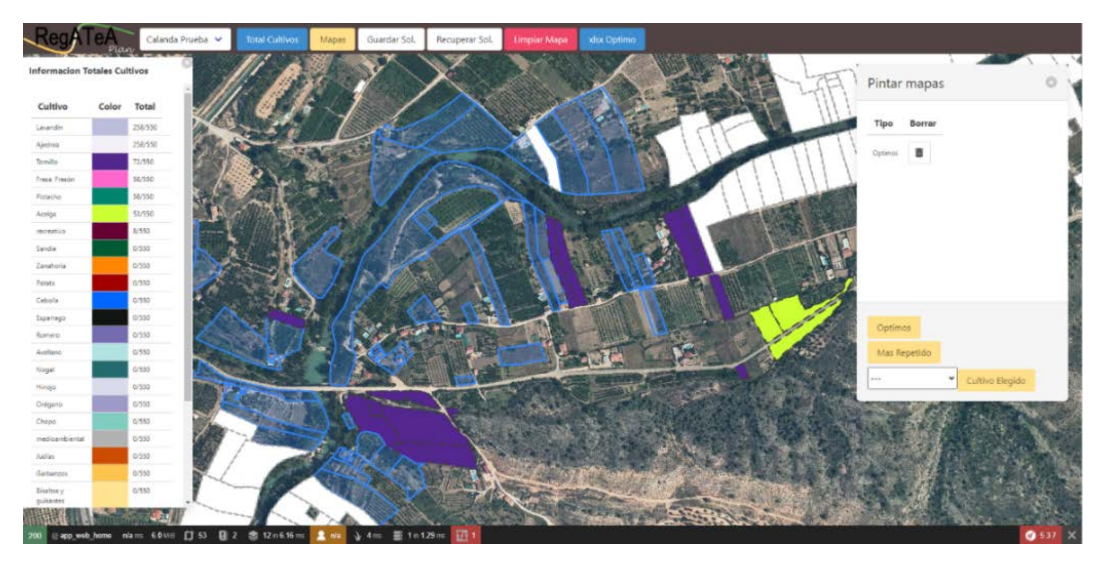


Figura 2. Distribución de las alternativas con el resultado de óptimos detectado por el SE.

En el siguiente paso se puede pedir al SE que a aquellas parcelas con varias alternativas asigne la que aparece como viable en un mayor número de parcelas estudiadas en el proyecto generado (Figura 3).

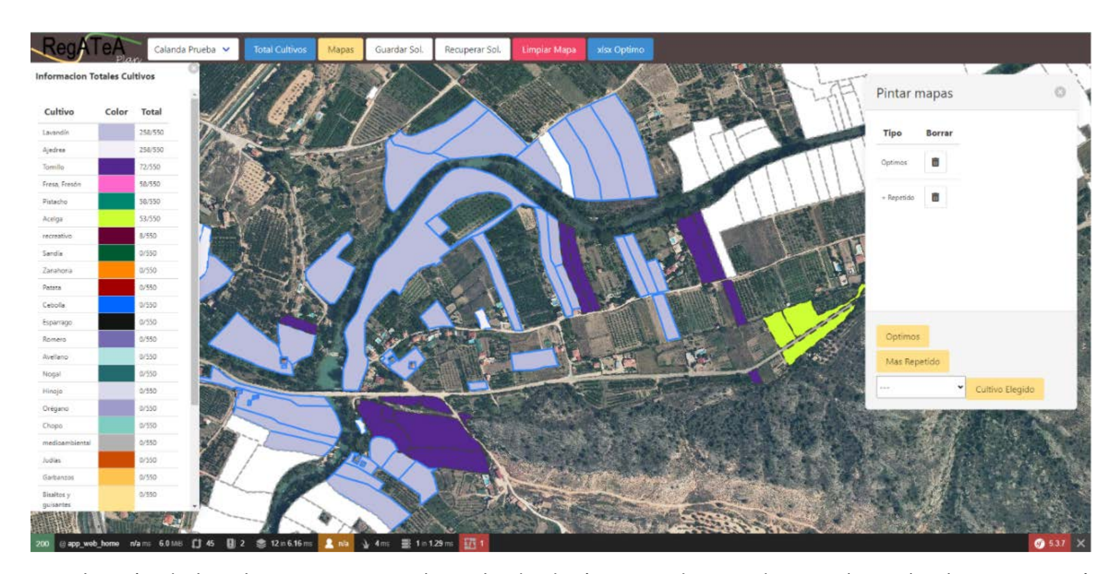


Figura 3. Distribución de las alternativas con el resultado de óptimos detectado por el SE y la alternativa más repetida en el proyecto.

A continuación, se completará de forma manual la asignación de alternativas en aquellas parcelas que se quedaron sin asignar previamente. Para ello se estudiarán las opciones de las parcelas que existen a su alrededor, con la idea de confeccionar un escenario coherente con las necesidades productivas de la zona y

sus habitantes, y ofrecer diferentes soluciones que se adapten a todo el conjunto y que sean beneficiosas para la zona donde se encuentra el escenario trabajado (Figura 4).

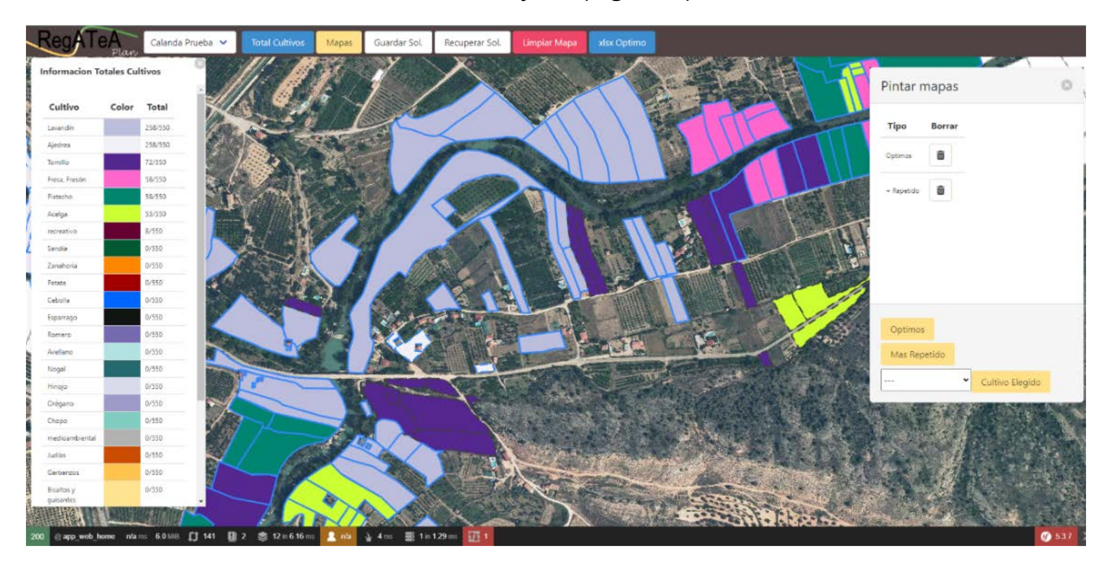


Figura 4. Distribución de las alternativas con el resultado de óptimos detectado por el SE, la alternativa más repetida en el proyecto y la asignación manual del usuario.

Al seleccionar una parcela (Figura 5), emerge una ventana en la que se muestra el listado de alternativas posibles para dicha parcela. Estas aparecen ordenadas de forma ascendente, dependiendo del número de veces que el SE la encontró viable en el conjunto de parcelas estudiadas, además de un conjunto de pestañas en las que podemos conocer porqué unas determinadas alternativas han sido excluidas de la solución viable.



Figura 5. Ejemplo de parcela sin óptimo (alternativa viable) encontrado por el SE y explicación de por qué han sido excluidas las diferentes alternativas propuestas.

La versión que se muestra en este trabajo es una versión alfa, que está previsto mejorar en un futuro próximo. En esta nueva versión se contempla ampliar el número de alternativas, incluir otro tipo de criterios como pueden ser los socioeconómicos, testear las reglas aplicadas en esta versión en otras zonas, evaluar y, cuando fuese necesario, modificar la asignación de datos realizada. También se pretende poner la herramienta a disposición de diferentes agentes locales con los que obtener un "feedback" del funcionamiento y conocer necesidades que estos tuvieran y que no hayan sido contempladas hasta el momento.

4. CONCLUSIONES

La versión alfa de la herramienta SIG que se ha desarrollado ha demostrado ser útil, fácil de utilizar por el usuario, amigable, y con una interfaz entendible y sencilla. RegATeA-Plan agiliza el trabajo del usuario para encontrar las alternativas productivas, ambientales y/o recreativas viables y beneficiosas para el conjunto de la zona; a la vez que resulta práctica para poder mostrar los diferentes resultados obtenidos a los agentes implicados en los procesos de revitalización de zonas sin manejo productivo. Así, es un buen primer paso para convertirse en una eficiente herramienta de apoyo a la toma de decisiones para plantear alternativas que eviten o reviertan el abandono de parcelas en los regadíos tradicionales de ribera en la provincia de Teruel. Si bien no había herramientas similares, el uso de SE resulta adecuado para las tareas que realiza la herramienta RegATeA-Plan. Este sistema de trabajo ha demostrado ser enormemente versátil y adaptable a las necesidades que una aplicación para la ayuda a la toma de decisiones presenta.

La herramienta es fácilmente ampliable y adaptable a nuevas utilidades que se presenten en un futuro tanto a corto como a medio plazo. La versión presentada será mejorada en un futuro próximo perfeccionando algunas funcionalidades e incorporando nuevas utilidades que cubran las necesidades de los usuarios finales y no solo las del grupo de expertos que ha participado en el desarrollo de la herramienta. Para ello, se pondrá a disposición de estos posibles usuarios finales la herramienta desarrollada hasta el momento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de actividades desarrolladas en el proyecto FITE-RegATeA que ha sido financiado por el Gobierno de España y el Gobierno de Aragón con cargo al fondo de inversiones de Teruel. Agradecemos la información aportada por el Banco de Germoplasma Hortícola de Zaragoza del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón y la investigadora Juliana Navarro Rocha en la caracterización de las alternativas productivas.

5. BIBLIOGRAFÍA

Abdelhamid, Y., Hassan, H., Rafea, A. (1997*). A proposed methodology for expert system engineering*. In 5th International conference on artificial intelligence applications. Egyptians Computer Society, Cairo, Egypt.

Alonso Sarría, F., Martínez Hernández, C., Romero Díaz, A., Cánovas García, F., Gomariz Castillo, F. (2015). *Principales variables ambientales que explican el abandono de cultivos en el sureste de España*. En J. de la Riva, P. Ibarra, R. Montorio, M. Rodrigues (Eds) Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación (pp. 453-462). Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio Universidad de Zaragoza.

Guillén M., Gómez-Báguena R., Salvador R., Martínez P., Montealegre A., Casterad M.A. (2022*). Contribución de la teledetección a la revalorización de agroecosistemas de ribera deteriorados en Teruel* En L. A. Ruiz, J. Estornell, M. González, J. Álvarez (Eds) Teledetección para una agricultura sostenible en la era del BIG DATA. XIX Congreso de la Asociación Española de Teledetección (pp. 217-220).

Guha, A., Guha, J. (1999*). Diseño de un sistema experto de agricultura de plantaciones para palma de aceite*. Revista Palmas, 20(4), 31-44.

Martín Santafé, M., Guillén Castillo, M., Gómez Báguena, R., Casterad Seral, M. A., Mallor Giménez, C., Navarro Rocha, J., Salvador Esteban, R. (2021). *Alternativas de cultivos en las riberas turolenses. Una herramienta para la toma de decisiones*. Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA). https://citarea.cita-aragon.es/citarea/handle/10532/5620

Morell-Monzó, S., Sebastiá-Frasquet, M.T., Estornell, J. (2022). *Cartography of citrus crops abandonment using altimetric data: LiDAR and SfM photogrammetry*. Revista de Teledetección, 59, 49-60. https://doi.org/10.4995/raet.2021.16698

Portalés-Julià, E., Campos-Taberner, M., García-Haro, F. J., Gilabert, M. A. (2021). *Assessing the sentinel-2 capabilities to identify abandoned crops using deep learning*. Agronomy, 11(4), 654. https://doi.org/10.3390/agronomy11040654

Rafael-Pérez, E., Morales-Hernández, M., Reyes-Morales, I.S., Navarrete-Infante, N. (2019). Manuel. *Sistema Experto para la Rotación de Cultivos en un Invernadero*. Revista de Ingeniería Innovativa. 3-9: 1-11. https://doi.org/10.35429/JOIE.2019.9.3.1.11

Rodríguez J., Díaz A. (2016). *Evolución del abandono de tierras de cultivo en la comarca oriental de la Región de Murcia*. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, (71), 9-29. https://doi.org/10.21138/bage.2272

Vidal-Macua, J. J., Ninyerola, M., Zabala, A., Domingo-Marimon, C., Gonzalez-Guerrero, O., & Pons, X. (2018). *Environmental and socioeconomic factors of abandonment of rainfed and irrigated crops in northeast Spain*. Applied Geography, 90, 155-174 https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.12.005

Yaya-Lévano, J.E.R., Angulo-Altamirano, (2020). *Diseño e implementación de un sistema experto para optimizar el control de plagas y enfermedades en el cultivo de la uva*. ÑAWPARISUN Revista de Investigación Científica, 3(1), 83-96. https://doi.org/10.47190/nric.v3i1.130



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 306-315

¿Hay relación entre exposición a la contaminación del aire y nivel de renta? Una exploración con regresión ponderada geográficamente

R.J. Hewitt[1,2], E. Caramés[1], R. Borge[3]

[1] *Observatorio para una Cultura del Territorio, 28012, Madrid, Spain.*
[2] *Grupo de Investigación en Transporte y Territorio (t-GIS), Departamento de Geografía, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid, España.*
[3] *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Departamento de Ingeniería Química Industrial y del Medio Ambiente, C/ José Gutiérrez Abascal, 2, 28006, Madrid, Spain.*

rhewitt@ucm.es, eduardo.carames@observatorioculturayterritorio.org, rafael.borge@upm.es

RESUMEN: Analizamos la posible relación entre el nivel de renta y la exposición a contaminantes en la atmósfera en la ciudad de Madrid y los municipios que la rodean. El análisis se realizó empleando datos de renta media por hogar (*gross household income*, GHI) al nivel de sección censal y datos de concentración de NO_2 y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente extraídos de un modelo de calidad del aire de mesoescala. Los datos GHI fueron sintetizados por zonas, empleando diferentes resoluciones (renta) y tamaños de malla (contaminantes), reduciendo así el problema del área mínima modificable y la incertidumbre sobre las conversiones de datos. Nuestros hallazgos apuntan a una clara relación negativa entre el nivel de ingresos de los hogares y la exposición a ambos contaminantes, visible en todas las resoluciones y los distintos tamaños de malla. La relación más fuerte entre la renta media y la contaminación de la atmósfera se encontró entre la Renta Media por Hogar Mínima (*minimum gross household income*, MGHI) y el NO_2 y el MGHI y el $PM_{2.5}$. Para abordar el alto grado de variabilidad en los modelos, exploramos la heterogeneidad espacial de las relaciones de regresión. Encontramos una reducción más pronunciada en la concentración de contaminantes según aumenta el nivel de renta, en el norte del área de estudio. Sería necesario seguir trabajando para explorar los patrones observados a nivel de distrito y vecindario.

Palabras-clave: contaminación del aire, renta, regresión ponderada geográficamente.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire causa graves impactos en la salud y aumenta la mortalidad, y la Organización Mundial de la Salud (OMS) la considera la mayor amenaza mundial para la salud ambiental (Izquierdo et al 2020). La proporción de la población mundial que vive en áreas urbanas va en aumento y se espera que siga aumentando en el futuro. Por lo tanto, es probable que aumente la exposición de la población y, en consecuencia, el aumento de la mortalidad en las zonas urbanas, a menos que se tomen medidas. Por lo tanto, mejorar la calidad del aire en las ciudades es una prioridad importante para organismos internacionales como la OMS y la Unión Europea (UE). En concreto, la contaminación del aire se refiere a altos niveles de concentración en el aire ambiental de contaminantes específicos, generalmente de vehículos motorizados y la quema de combustibles fósiles para energía. Las partículas (PM), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el ozono (O_3) se consideran especialmente peligrosos para la salud humana. Dada la gran diversidad de sistemas de calefacción y transporte en las ciudades, así como los factores climáticos, los niveles de concentración del aire ambiental varían ampliamente en el tiempo y el espacio. Los modelos de calidad del aire, como los modelos comunitarios de calidad del aire multiescalar (CMAQ por sus siglas en inglés), ofrecen la oportunidad de examinar esta variabilidad a una resolución espacial media-alta.

Al mismo tiempo, la mayoría de las ciudades hoy en día tienden a estar espacialmente segregadas por grupo socioeconómico. Los precios de las propiedades tienden a ser más altos en áreas bien conectadas con servicios de alta calidad, y los residentes con ingresos más bajos tienden a verse obligados a abandonar estas áreas y trasladarse a la periferia urbana. Es probable que la mala calidad del aire y sus impulsores relacionados (la proximidad a las carreteras y la industria) sean un factor en la elección del vecindario de los residentes, siendo los menos acomodados los que menos pueden elegir. En este sentido, varios estudios han investigado

la posible relación entre los factores socioeconómicos y la exposición a la contaminación del aire, reflejada por varios indicadores, p. estatus migratorio, origen étnico, perfil de edad o nivel educativo (Prieto-Flores et al., 2021). En este estudio investigamos la posible correlación entre ingresos más bajos y niveles más altos de contaminación del aire en la ciudad de Madrid y sus municipios vecinos. Para hacer esto, utilizamos valores de concentración simuladas por un modelo CMAQ para dos contaminantes especialmente señalados como perjudiciales a la salud por los organismos nacionales e internacionales, NO_2 y $PM_{2.5}$, junto con datos de ingreso bruto de los hogares a nivel del distrito censal, obtenidos del Instituto Nacional de Estadística de España (INE).

2. ÁREA DE ESTUDIO

Nuestro estudio se centra en la ciudad de Madrid, un municipio urbano con una superficie de 604,3 km^2 y más de 3 millones de habitantes (Figura 1).

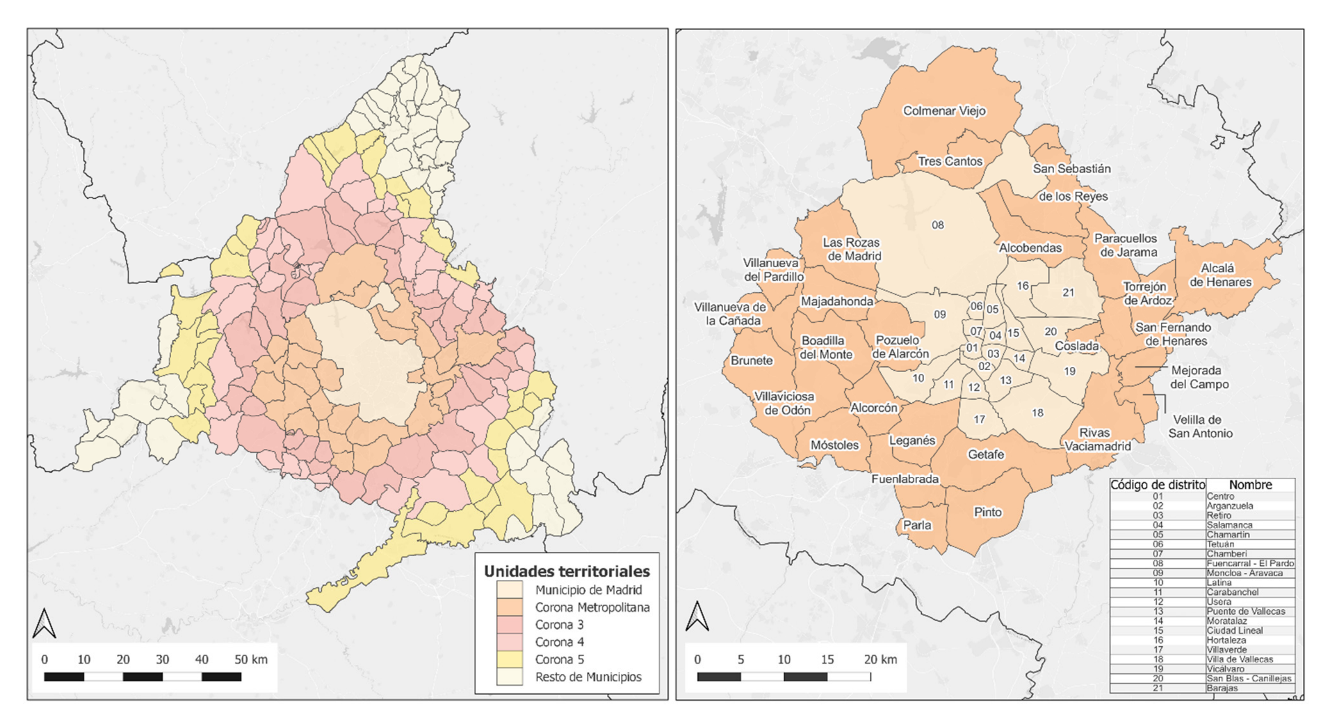


Figura 1. El municipio de Madrid (rojo) y los municipios suburbanos que componen el área metropolitana. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto Geográfico Nacional de España.

El ayuntamiento ha estimado que aproximadamente 2,5 millones de vehículos parten o terminan en la ciudad de Madrid en un día típico de la semana, con alrededor de 40 millones de kilómetros recorridos en un día típico en la ciudad (Izquierdo et al 2020); esto inevitablemente genera altas concentraciones de contaminación aérea. La contaminación del aire en Madrid provoca unas 88 muertes al año por partículas (PM) y 519 por dióxido de nitrógeno (NO_2), lo que equivale a 4 muertes por cada 100.000 habitantes en el primer caso, y 23 muertes por cada 100.000 casos en el segundo (Izquierdo et al 2020). Dentro del municipio de Madrid se ha estimado que el 74,4% del total de emisiones locales de NO_2 (es decir, las que se generan dentro de la propia ciudad), son atribuibles al tráfico rodado (Ayuntamiento de Madrid 2019). Al igual que muchas ciudades modernas, el área urbana central que comprende el municipio de Madrid está rodeada de ciudades suburbanas adyacentes que albergan grandes poblaciones atraídas por el fácil acceso al centro de la ciudad y los precios inmobiliarios comparativamente más bajos. Estos municipios adyacentes comprenden la periferia metropolitana (Corona Metropolitana en la Figura 1), y son importantes centros de población e industria, pero también fuertemente residenciales en carácter y altamente desiguales socioeconómicamente. Dos de estos municipios, Pozuelo de Alarcón y Boadilla del Monte, al oeste de la ciudad, contienen varios distritos censales con niveles de renta bruta familiar de los más altos de España (129.750€) (INE 2022, datos de 2019). Otros cuatro, Alcalá de Henares al este de la ciudad, y Parla, Getafe y Leganés al sur, cuentan cada uno con un distrito censal con ingresos familiares entre los más bajos de España (< 25.000€) (INE 2022, datos de 2019).La alta densidad de población en la periferia metropolitana, junto con el alto volumen de viajes en vehículos motorizados en las horas punta, conduce a la congestión del tráfico en las entradas, salidas y puntos de intersección clave de la ciudad (puntos críticos relacionados con el tráfico: consulte, por ejemplo,

Quaassdorff et al 2016) NO_2 y las concentraciones de $PM_{2,5}$ tienden a ser más altas en estos puntos, así como en las carreteras y áreas cercanas, lo que demuestra que el tráfico rodado es claramente el principal contribuyente a los niveles de contaminación del aire en Madrid (Borge et al 2014). El ciclo también juega un papel importante en los niveles de concentración ambiental resultantes, especialmente el pico de NO_2 al final de la tarde (Borge et al 2018). Por estos motivos, elegimos un área de estudio que incluyera toda el área metropolitana, incorporando tanto el municipio de Madrid como la periferia metropolitana (Figura 1). Por lo tanto, el área de estudio incluye disparidades de ingresos que se encuentran entre las más grandes de España, así como puntos clave de contaminación urbana.

3. DATOS Y MÉTODOS

3.1. Datos de contaminación atmosférica

Para la contaminación del aire, utilizamos concentraciones simuladas de dióxido de nitrógeno (NO_2) y partículas de menos de 2,5 micrómetros de diámetro ($PM_{2,5}$) salida del Modelo CMAQ para Madrid (Figura 2). El modelo CMAQ estima la concentración en $\mu g/m^3$ de NO_2 y $PM_{2,5}$ para el año 2015 para toda la Comunidad de Madrid (p.e. véase Izquierdo et al., 2020) mediante un modelo de velocidad media de la circulación del tráfico. Los datos tienen forma de malla cuadrada de celdas de 1 km^2, en la que cada celda de la malla es un objeto poligonal georreferenciado único en formato GIS vectorial con un atributo adjunto que contiene el valor de concentración estimado. Para estos contaminantes, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece una serie de valores límite en función de su peligrosidad para el ser humano, siendo los valores máximos de NO_2 a los que puede estar expuesta una persona en un periodo de 1 año 40 $\mu g/m^3$ para NO_2y 25 $\mu g/m^3$ para $PM_{2,5}$(Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021). La Directiva Europea 2008/50/CE establece niveles de exposición máximos permitidos anuales de 40 $\mu g/m^3$ para NO_2 y 20 $\mu g/m^3$ para $PM_{2,5}$, ambos límites replicados en la legislación española (RD 102/2011).

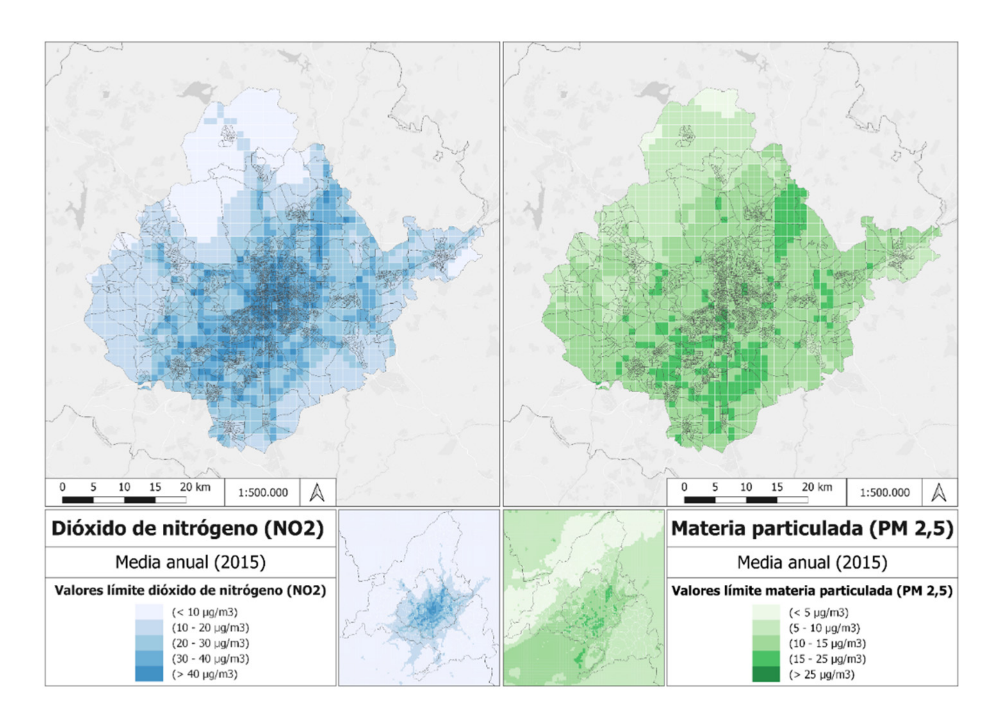


Figura 1. Concentraciones de contaminantes NO^2 (izquierda) y $PM_{2,5}$(derecha) según los valores límite de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Fuente; CMAQ).

3.2. Datos de renta por hogar

Para los ingresos de los hogares se utilizó el Atlas de distribución de renta de los hogares del INE (INE 2022). Extrajimos los datos del ingreso bruto del hogar (GHI, por sus siglas en inglés) a nivel del distrito censal, los datos de mayor resolución actualmente disponibles públicamente para el año 2015, para que coincidan con la fecha en la que estaban disponibles los datos simulados de contaminación del aire (Figura 3). Cuando los datos no estaban disponibles para el año 2015, se eligió la fecha disponible más cercana (2016, 2017 o 2018).

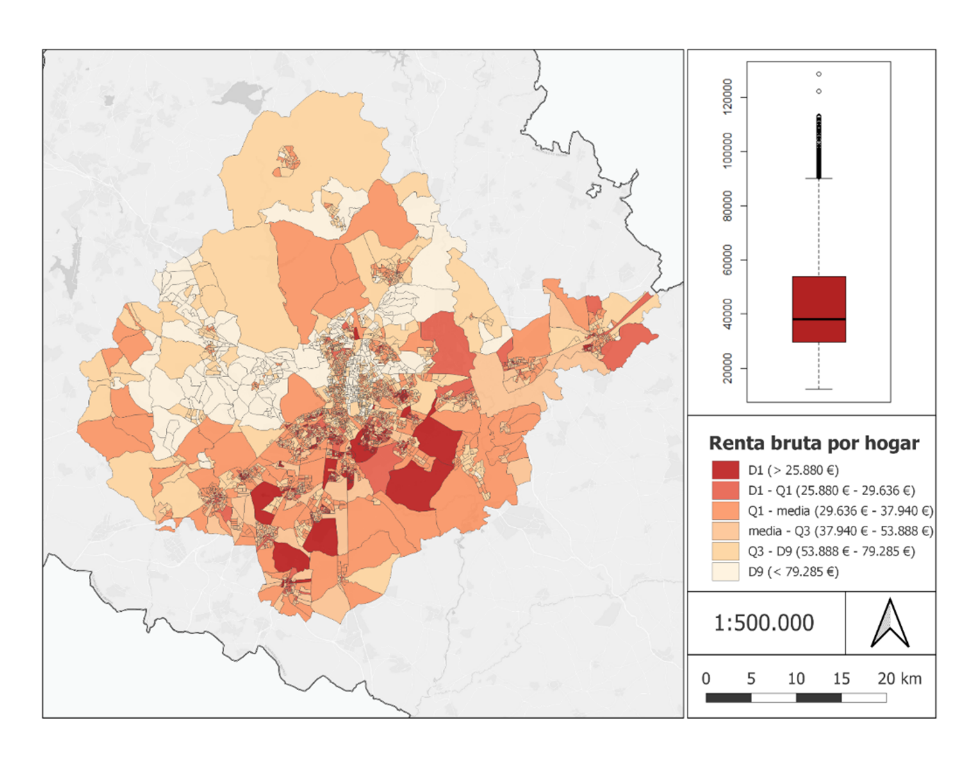


Figura 2. Distribución de la renta bruta por hogar en la corona metropolitana y el municipio de Madrid. (Fuente; Instituto Nacional de Estadística [INE]).

3.3. Preparación de datos y análisis estadístico

En primer lugar, transformamos la cobertura de polígonos vectoriales del GHI por sección censal obtenida del INE en formato rasterizado (rasterización). Utilizamos una operación de estadística zonal en el SIG para extraer y resumir los datos de GHI a nivel de píxel obtenidos de la operación de rasterización para cada km^2 de la cuadrícula del modelo CMAQ. Desde la operación de estadística zonal salieron cuatro resultados para cada km^2: 1) GHI medio dentro de cada km^2; 2) GHI máximo dentro de cada km^2; 3) GHI mínimo dentro de cada km^2; GHI total dentro de cada km^2; 4) GHI mínimo dentro de cada km^2. A continuación, se realizó una regresión por mínimos cuadrados ordinarios (OLS) utilizando la concentración media anual simulada de NO_2 para el año 2015 como variable dependiente (y), y cada una de las cuatro variantes del GHI como variable independiente (x). El proceso se repitió utilizando la concentración media anual simulada de $PM_{2,5}$ para el año 2015 como variable dependiente (y). Dado que sólo el GHI mínimo (minGHI) produjo una respuesta significativa para $p < 0,01$ con > 10% de la varianza explicada (tanto para NO2 como para $PM_{2,5}$) y las variantes del GHI no son claramente independientes entre sí, no se utilizó un modelo de regresión múltiple. Para garantizar la distribución normal de los residuos -un requisito clave de la regresión lineal- se realizó una transformación logarítmica de las variables dependientes e independientes.

Para tener en cuenta el Problema de la Unidad Espacial Modificable (MAUP, Openshaw 1981), que señala que la información estadística depende del tamaño de la zona en el que se muestrean los datos, así como la incertidumbre derivada de la operación de rasterización (Díaz Pacheco et al 2018), seguimos dos protocolos distintos. Primero, rasterizamos la capa vectorial del GHI a cuatro resoluciones diferentes - 48m, siendo el tamaño de celda más apropiado para la capa vectorial del GHI según la regla de Piwowar (véaseCongleton1997), 100m, 200m y 500m. Después, resumimos las estadísticas zonales de los mapas ráster del GHI a 48m, 100m, 200m y 500m de resolución utilizando una malla vectorial más grande, obtenida mediante la duplicación de la malla original mediante la agrupación de pares de cuadriculas individuales en cada eje, creando así una malla de cuadrículas de $4km^2$. De este modo, se comprobó tanto el efecto de la resolución de las celdas de la rasterización de los datos del GHI como el efecto del tamaño de las unidades de información. Como se ha señalado anteriormente, tanto para las concentraciones simuladas de NO_2 y $PM_{2,5}$ (Figura 2) como para el GHI (Figura 3) los valores parecían agruparse en lugares concretos. Este fenómeno, conocido como autocorrelación espacial, es prácticamente omnipresente en los datos geográficos, pero puede ser problemático si no se tiene en cuenta en los modelos de regresión. En particular, los estudios empíricos han demostrado que la regresión OLS sobre datos espacialmente autocorrelacionados conduce a una baja preci-

sión (alta varianza, lo que da un mal ajuste del modelo) y a errores de tipo 1 (afirmar que existe una correlación cuando no existe, o afirmar que no existe una correlación cuando sí existe) (Hazigüzeller 2020).

La autocorrelación espacial se investigó utilizando la prueba I de Moran, confirmando así la dependencia espacial de los residuos, en efecto, la existencia de la autocorrelación espacial, para el NO_2 y las PM2,5 y el GHI mínimo, máximo, medio y total (Gimond 2019). Para visualizar las variaciones en la pendiente de la regresión provocadas por la autocorreclación, utilizamos la función *coplot* (Brundsdon 2015). Para entender las implicaciones de la autocorrelación espacial a lo largo del área de estudio, se exploró la relación entre NO_2 y GHI min y PM2,5 y GHI min utilizando la regresión ponderada geográficamente (paquete GWmodel en R). La GWR es una técnica bien conocida que pretende superar las limitaciones de los enfoques de regresión global cuando las variables tienen un alto grado de autocorrelacion espacial. En este estudio, se siguió el método GWR presentado por Brunsdon (2015), que consiste en dividir el área de estudio en ventanas circulares locales conocidas como *kernels*, y llevar a cabo regresiones locales individuales dentro de cada kernel. Los puntos de datos del kernel se ponderan en función de su distancia al centro del kernel, conocido como el *ancho de banda*, lo que les confiere una influencia decreciente en la ecuación de regresión a medida que aumenta la distancia (Brunsdon, 2015). Cuanto menor sea el ancho de banda del núcleo, menor será el conjunto de datos incluido en la ecuación de regresión. Evidentemente, hay que encontrar el balance entre el ancho de banda y la fiabilidad, ya que un ancho de banda del kernel igual o mayor que el tamaño del área de estudio no contribuye información que no pueda obtenerse mediante el modelo de regresión global, mientras que un ancho de banda muy pequeño puede dar resultados poco fiables debido al reducido número de observaciones incluidos en la ecuación de regresión. El problema puede resolverse estimando el error estándar del análisis con diferentes anchos de banda. El análisis GWR se llevó a cabo para anchos de banda de 10.000, 5.000 y 2.500 metros con el kernel gaussiano, y el error estándar se calculó para cada conjunto de resultados utilizando la técnica de *bootstrapping* (Brunsdon 2015). Para todos los análisis se uso el software estadístico R.

4. RESULTADOS

4.1. Regresión de mínimos cuadrados ordinarios

La regresión OLS a nivel global reveló una clara relación negativa entre el nivel de ingresos de los hogares y la exposición tanto a NO_2 como a $PM_{2,5}$. Aunque la adecuación del modelo varió en función de la resolución y el tamaño de la cuadrícula elegidos, la correlación estuvo claramente presente en todas las resoluciones y en ambos tamaños de malla (Tabla 1). La asociación más fuerte (el mayor coeficiente de determinación R2 y el menor error estándar residual RSE) entre los ingresos y la contaminación atmosférica se encontró para la renta bruta por hogar mínima (MGHI) y el NO_2, y los MGHI y las $PM_{2,5}$(Tabla 1).

Los modelos de regresión global explicaron entre el 10% y el 20% de la varianza para MGHI y NO_2, y entre el 12% y el 19% de la varianza para MGHI y $PM_{2,5}$, dependiendo de la resolución y el tamaño de la cuadrícula elegidos (Tabla 1). El error residual estándar varió entre 0,55-0,58 para MGHI y NO_2 y entre 0,28-0,30 para MGHI y $PM_{2,5}$. Aunque las cuadrículas de 2km x 2km muestran una aparente mejora en el ajuste del modelo, hay que recordar que las concentraciones simuladas originales del modelo CMAQ se generaron para una cuadrícula de 1x1km. Una mayor generalización espacial en este caso se aleja de los datos originales, pero mejora el ajuste al eliminar los valores atípicos. Habiendo establecido que las correlaciones son fiables en todas las resoluciones y en ambos tamaños de rejilla, se utilizó la rejilla de 1km x 1km con los datos GHI de 48 x 48m de resolución para el análisis GWR, siendo el tamaño de rejilla original del modelo y la resolución recomendada según la regla de Piwowar (Congleton1997). Al ser la variable con mejor rendimiento en el análisis OLS, sólo se mantuvo el MGHI como variable independiente en el análisis GWR.

Tabla 1. Resultados de regresión (OLS) para los datos de renta bruta mínima por hogar para diferentes resoluciones y tamaños de malla. Todos con valor de p < 0,0001. El nombre de la primera columna "NO2renta1_1_1_100clip" hace referencia al contaminante usado, la variable de renta seguido de la dimensión de la malla y por último la resolución del píxel del mapa raster del que fueron extraídos los datos (48, 100, 200, 500).

Análisis	Modelo	Coefi-ciente	R^2	Error estándar de los residuos (RSE)	Grados de libertad	Estadístico F
NO2renta1_1_100	yvar ~ xmin	-0.482	0.137	0.569	1878	297.759
NO2renta1_1_200	yvar ~ xmin	-0.464	0.127	0.572	1878	273.417
NO2renta1_1_48	yvar ~ xmin	-0.489	0.14	0.568	1878	306.373
NO2renta1_1_500	yvar ~ xmin	-0.428	0.103	0.58	1878	216.674
NO2renta2_2_100	yvar ~ xmin	-0.607	0.196	0.548	502	122.353
NO2renta2_2_200	yvar ~ xmin	-0.585	0.18	0.553	502	110.192
NO2renta2_2_48	yvar ~ xmin	-0.592	0.188	0.551	502	116.45
NO2renta2_2_500	yvar ~ xmin	-0.58	0.17	0.557	502	102.872
PM25renta1_1_100	yvar ~ xmin	-0.251	0.139	0.294	1878	303.087
PM25renta1_1_200	yvar ~ xmin	-0.248	0.135	0.295	1878	293.933
PM25renta1_1_48	yvar ~ xmin	-0.254	0.141	0.294	1878	308.491
PM25renta1_1_500	yvar ~ xmin	-0.24	0.121	0.297	1878	258.155
PM25renta2_2_100	yvar ~ xmin	-0.306	0.185	0.286	502	114.268
PM25renta2_2_200	yvar ~ xmin	-0.3	0.176	0.288	502	107.085
PM25renta2_2_48	yvar ~ xmin	-0.3	0.18	0.287	502	110.171
PM25renta2_2_500	yvar ~ xmin	-0.292	0.161	0.29	502	96.005

4.2. Pruebas de autocorrelación espacial

Se aplicó el estadístico I de Moran utilizando el método de simulación de Monte Carlo descrito por Gimond (2019) y se encontró que todas las variables estaban altamente autocorrelacionadas espacialmente en todos los tamaños y resoluciones de celdas (p < 0,01). Es probable que la baja precisión de los modelos de regresión global (Tabla 1) se deba, al menos en parte, al fenómeno de autocorrelación espacial.

4.3. Regresión ponderada geográficamente(GWR)

Para explorar el grado de variación en el área de estudio que implica la prueba de autocorrelación espacial, utilizamos la función de *coplot* descrita por Brunsdon (2015) para dividir el área de estudio en paneles de igual tamaño y visualizar las relaciones en cada parte del área de estudio utilizando los paneles separados. Los *coplots* indicaron una pendiente de regresión más pronunciada en la parte central del norte del área de estudio (parte superior central), y una mucho menos pronunciada en el resto, siendo la tendencia plana o incluso ligeramente invertida en el extremo oriental. Esto indicaba una tasa de disminución más pronunciada de las concentraciones de contaminantes a medida que aumenta la renta mínima en el norte de la zona de estudio, y una relación ausente o no detectable en el este. Hay poca diferencia en el patrón entre cualquiera de los dos contaminantes. Los *coplots* confirmaron la impresión de alta heterogeneidad espacial indicada por la prueba I de Moran. Los resultados del GWR permitieron explorar este fenómeno con más detalle, indicando un rango de variación de los coeficientes de regresión mucho mayor que el que se podía observar en los resultados globales del OLS (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados del análisis GWR, en comparación con los resultados de la regresión OLS.

Análisis	Variables (y ~ x)	Coeficiente	Coeficiente Min	Coeficiente mediano	Coeficiente Max
Global OLS NO_2	NO_2 ~ MinGHI	-0.489	-	-	-
GWR NO_2 BW 10000	NO_2 ~ MinGHI	-	-0.602	-0.226	0.396
GWR NO_2 BW 5000	NO_2 ~ MinGHI	-	-0.809	-0.072	0.895
GWR NO_2 BW 2500	NO_2 ~ MinGHI	-	-1.160	0.006	1.512
Global OLS PM2.5	$PM_{2.5}$ ~ MinGHI	-0.254	-	-	-
GWR $PM_{2.5}$ BW 10000	$PM_{2.5}$ ~ MinGHI	-	-0.291	-0.1	0.304
GWR $PM_{2.5}$ BW 5000	$PM_{2.5}$ ~ MinGHI	-	-0.455	0.011	0.594
GWR $PM_{2.5}$ BW 2500	$PM_{2.5}$ ~ MinGHI	-	-0.678	0.056	0.531

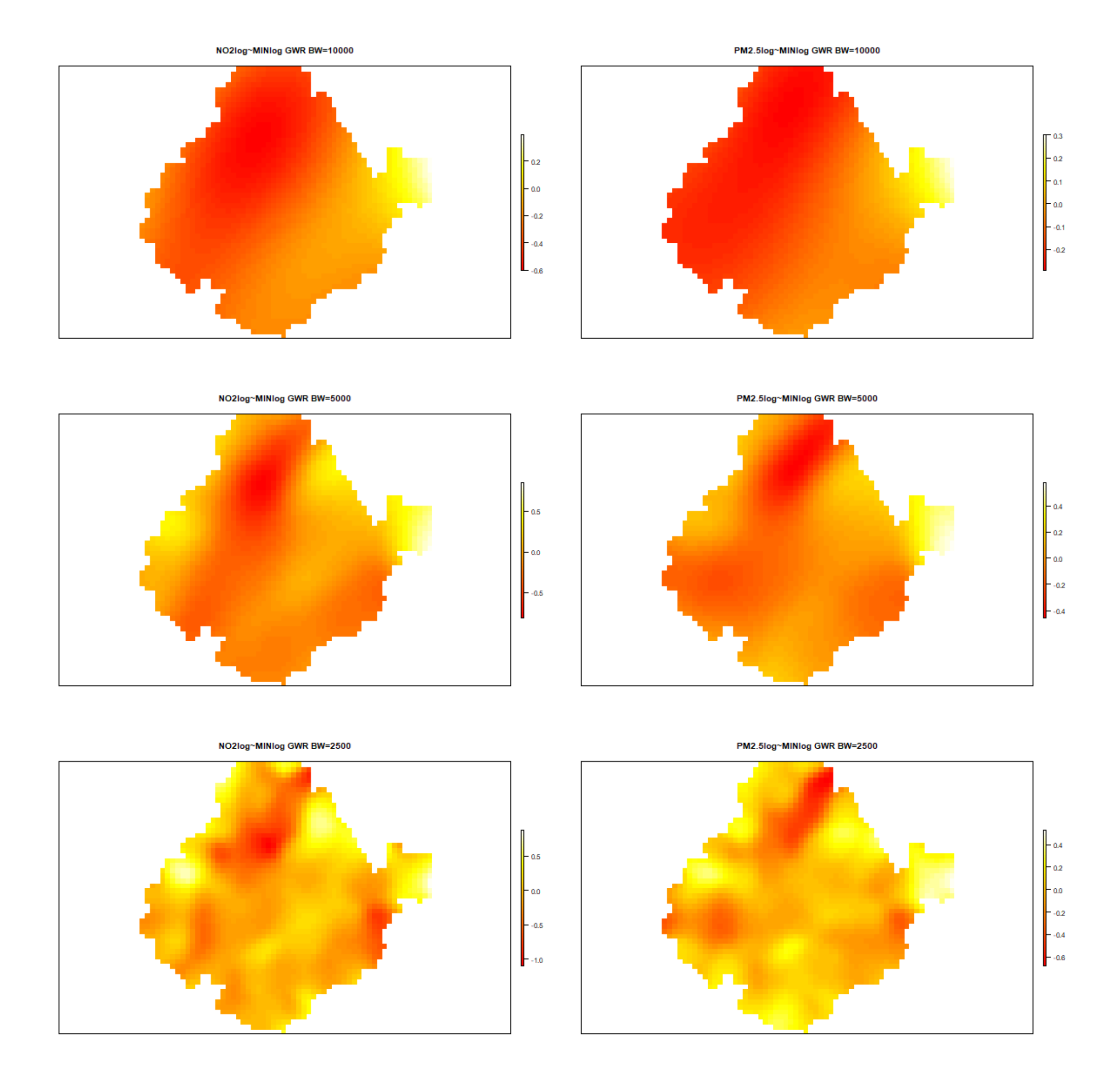


Figura 4. Resultados de GWR para NO2log~minlog (izquierda) y PM25log~minlog (derecha), para cada ancho de banda. En ambos casos, el descenso más pronunciado de las concentraciones de contaminantes a medida que aumenta la renta mínima por hogar (línea de tendencia más pronunciada) se encuentra en las partes norte y central del área de estudio. La reducción del ancho de banda parece producir patrones más resueltos, sin embargo, la variación extrema en las estimaciones del coeficiente a través de los anchos de banda indica un alto nivel de incertidumbre.

Mientras que la ecuación de regresión global OLS estimó un valor de coeficiente (m en la ecuación de regresión lineal y=mx+c) en toda la zona de estudio de -0,489 (NO_2) y -0,254 (PM2,5), las estimaciones de

coeficiente GWR varían, como es lógico, mucho más. Por cada unidad de cambio en la variable MinGHI, en el ancho de banda 10000m, el incremento medio en la variable de respuesta NO_2 o $PM_{2,5}$ varía de -0,602 a 0,396 (NO_2) y de -0,291 a 0,304 ($PM_{2,5}$) (Tabla 2). Como muestra la tabla, la variación aumenta a medida que disminuye el ancho de banda. Aunque estos valores no son intuitivamente significativos debido a la transformación logarítmica, el cambio de signo indica una importante diferencia en la línea de regresión dependiendo de la localidad específica investigada. Este análisis proporciona más detalles de los que podríamos obtener de los *coplots*, y una cuantificación fiable del grado de variación de las relaciones exploradas.

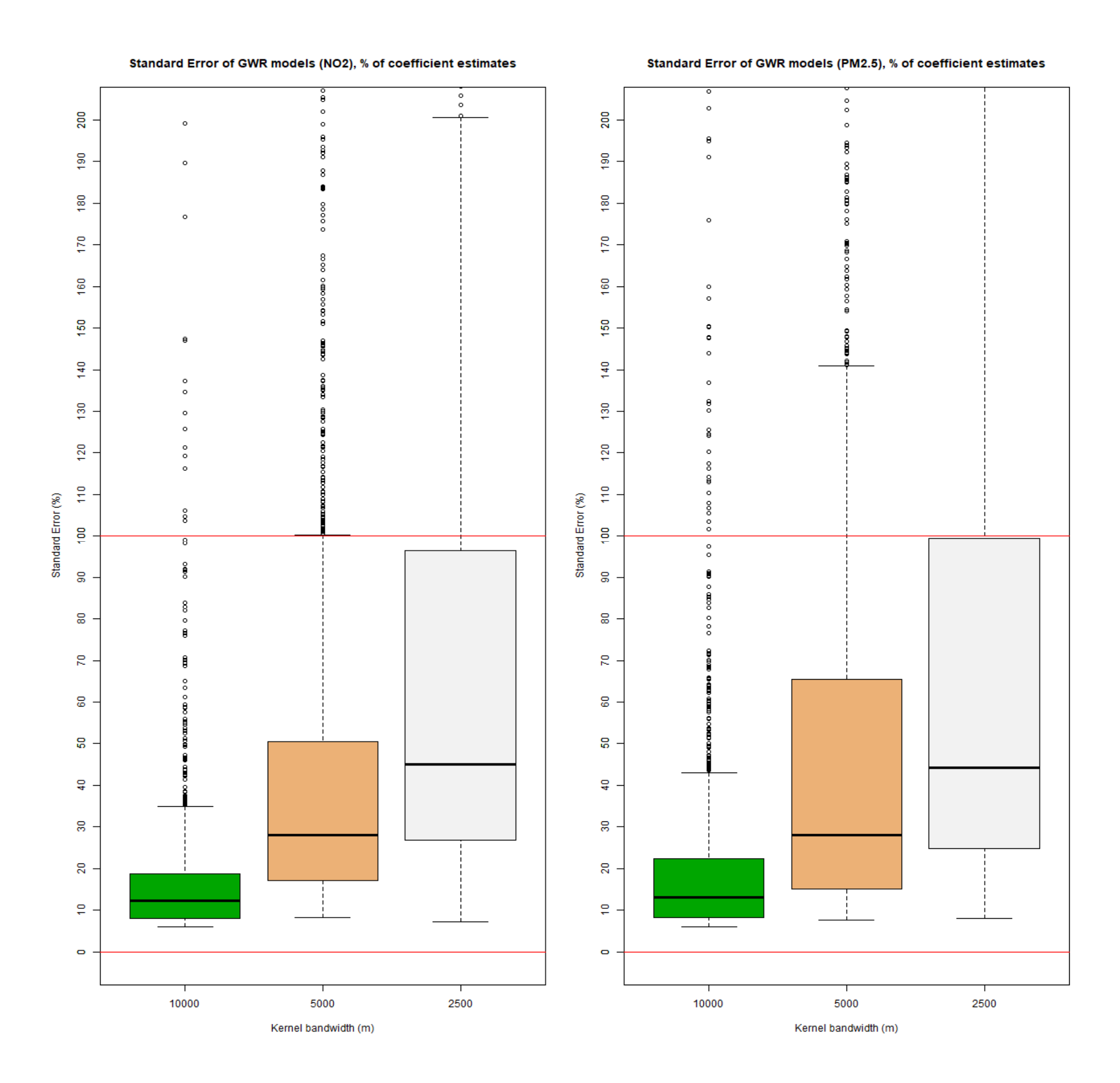


Figura 5. Estimaciones del error estándar (SE) de los resultados de GWR para NO_2(izquierda) y $PM_{2,5}$(derecha), para cada ancho de banda como porcentaje de las estimaciones del coeficiente. Las líneas rojas horizontales indican el SE del 0% y del 100% de las estimaciones del coeficiente. Nótese que para los resultados del análisis GWR de $PM_{2,5}$, el porcentaje de error es mayor que para NO_2tanto para los anchos de banda de 10000m como de 2500m.

Los gráficos de estos resultados (Figura 4) muestran claramente la variación en la relación entre las concentraciones de contaminantes y la renta mínima, con un aumento de la renta mínima que lleva a una caída más pronunciada de la contaminación en las partes norte y central del área de estudio. Aunque los anchos de banda del kernel más pequeños parecen producir patrones más resueltos, la variación extrema en las estimaciones del coeficiente a través de los anchos de banda (Tabla 2) indica un nivel muy alto de incertidumbre. Para investigar la fiabilidad de los resultados del análisis GWR, se calcularon las estimaciones del error estándar mediante la técnica de *bootstrap* (Brunsdon 2015).

Los resultados de la estimación *bootstrap* del error estándar del modelo muestran que la reducción del tamaño del núcleo aumenta el error en las estimaciones de los coeficientes hasta un grado inaceptable (Figura 5). Para los modelos de ancho de banda de 10000m, el error estándar estimado se sitúa en torno al 20% de los valores de estimación de los coeficientes para tres cuartas partes de los datos (18,82 para NO_2 y

22,37 para $PM_{2,5}$en el tercer cuartil). Aunque ya es bastante grande, la figura 5muestra cómo este error parece aumentar bruscamente a medida que se reduce el ancho de banda del kernel. Para el mayor ancho de banda, aunque la variación espacial de la relación es bastante general, podemos concluir que es probable que el diferencial norte-sur sea real, ya que los errores en el norte y el oeste de la zona de estudio, donde la variación espacial es más evidente, son relativamente bajos (5-20% de la estimación del coeficiente).

5. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Nuestro análisis indica una relación negativa entre los niveles de exposición a la contaminación por NO_2 y $PM_{2,5}$y la renta bruta de los hogares. En general, dentro del área metropolitana de Madrid, que comprende la ciudad de Madrid y los municipios suburbanos adyacentes, a medida que aumenta la renta mínima, disminuyen las concentraciones de contaminantes transportados por el aire, según las estimaciones de un modelo fotoquímico euleriano de calidad del aire. Cabe destacar que la variable de ingresos más importante, por cierto margen, fue la renta mínima, en lugar de la renta total, máxima o media de los hogares. Esto sugiere que los enfoques políticos que buscan aumentar los ingresos mínimos en general probablemente tengan impactos positivos en la calidad de vida.

El patrón muestra una considerable heterogeneidad espacial, en particular un descenso más pronunciado de las concentraciones de contaminación con el aumento de los ingresos mínimos en las partes central y septentrional del área de estudio, que corresponden, aproximadamente, a los municipios de Colmenar Viejo y Tres Cantos en el norte, y Las Rozas, Majadahonda, Boadilla de Monte, Pozuelo de Alarcón al noroeste de la ciudad, y la parte septentrional del municipio de Madrid (Fuencarral-El Pardo). Los resultados no son del todo sorprendentes, ya que estas zonas gozan de una baja densidad urbana y de la red de transporte y de muchos parques y otras zonas verdes. La pendiente de la línea de regresión entre la contaminación y la renta mínima (Figura 4) era más baja en las zonas del centro y centro-sur, principalmente porque en esta zona había menos localidades con bajas concentraciones de contaminación, a diferencia del norte.

Hay que señalar algunas limitaciones, como las siguientes. Nuestros resultados son bastante generales, pero los intentos de desagregar más espacialmente disminuyendo el ancho de banda del GWR aumentaron la incertidumbre hasta niveles inaceptables (error estándar como % de las estimaciones del coeficiente >20% para el 75% de los datos). Por una parte, una estimación de las concentraciones de contaminantes con una resolución espacial más fina que la disponible actualmente en el modelo de calidad del aire utilizado ($1km^2$), podría ofrecer una mayor apreciación del grado de variación espacial de los contaminantes señalados. Lamentablemente, esta es una tarea bastante difícil. Aunque se sabe que existen productos de mayor resolución espacial, su fiabilidad puede ser cuestionada. Por otra parte, la obtención de datos de renta bruta por hogar para un nivel administrativo más detallado que la sección censal (por ejemplo, el nivel de manzano o edificio) seguramente mejoraría apreciablemente la calidad de los resultados. Sin embargo, por razones de protección de datos, estos datos no suelen ser de libre acceso. En futuros estudios, el análisis podría ampliarse con la aplicación de diferentes contaminantes, como el ozono (O_3) o el dióxido de azufre (SO_2). Por último, aunque hemos utilizado la renta bruta de los hogares, en futuras investigaciones sería interesante utilizar otros indicadores de privación social, como la separación de la población por actividad laboral, nivel de educación, rango de edad, etc. Existen indicadores compuestos de privación múltiple para algunos países y regiones (por ejemplo, Escocia), y es posible que se puedan obtener para el caso de España.

6. BIBLIOGRAFÍA

Ayuntamiento de Madrid (2019). Air quality and climate change plan for the city of Madrid. Gen. Sustain. Environ. Control. Disponible en: https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Sostenibilidad/CalidadAire/Ficheros/PlanAire&CC_Eng.pdf

Borge, R., Lumbreras, J., Pérez, J., de la Paz, D., Vedrenne, M., de Andrés, J. M., Rodríguez, M. E. (2014). Emission inventories and modeling requirements for the development of air quality plans. Application to Madrid (Spain). Science of the Total Environment, 466, 809-819.

Borge, R., Artíñano, B., Yagüe, C., Gomez-Moreno, F. J., Saiz-Lopez, A., Sastre, M., Cristóbal, Á. (2018). Application of a short term air quality action plan in Madrid (Spain) under a high-pollution episode-Part I: Diagnostic and analysis from observations. Science of the Total Environment, 635, 1561-1573.

Brunsdon (2015) Geographically Weighted Regression. https://rpubs.com/chrisbrunsdon/101305

Congalton, R. G. (1997). Exploring and evaluating the consequences of vector-to-raster and raster-to-vector conversion. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 63(4), 425-434.

Gimond, M (2019) A basic introduction to Moran's I analysis in R. https://mgimond.github.io/simple_moransI_example/

Hacıgüzeller, P. (2020). Spatial applications of correlation and linear regression. In Archaeological Spatial Analysis (pp. 135-154). Routledge.

Izquierdo, R., Dos Santos, S. G., Borge, R., de la Paz, D., Sarigiannis, D., Gotti, A., Boldo, E. (2020). Health impact assessment by the implementation of Madrid City air-quality plan in 2020. Environmentalresearch, 183, 109021.

Quaassdorff, C., Borge, R., Pérez, J., Lumbreras, J., de la Paz, D., de Andrés, J. M. (2016). Microscale traffic simulation and emission estimation in a heavily trafficked roundabout in Madrid (Spain). Science of the Total Environment, 566, 416-427.

Prieto-Flores, M. E., Gómez-Barroso, D., Jiménez, A. M. (2021). Geographic health inequalities in Madrid City: exploring spatial patterns of respiratory disease mortality. Human Geographies, 15(1), 5-16.

Openshaw, S. (1981). The modifiable areal unit problem. Quantitative geography: A British view, 60-69.

Organiación Mundial de Salud (OMS) (2021). Ambient (outdoor) air pollution Key facts https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 316-324

Identificación de modelos de combustible forestal en ambientes mediterráneos mediante un vehículo aéreo no-tripulado (UAV)

R. Hoffrén Mansoa[1], M.T. Lamelas Gracia[1,2], J. de la Riva Fernández[1]

[1] *Geoforest-IUCA, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza.*
[2] *Centro Universitario de la Defensa, Academia General Militar, Ctra. Huesca s/n, 50090 Zaragoza*

rhoffren@unizar.es, tlamelas@unizar.es, delariva@unizar.es

RESUMEN: Los ambientes mediterráneos se encuentran recurrentemente afectados por incendios forestales. Para poder entender el comportamiento que puede tener el fuego sobre el territorio resulta necesario conocer los combustibles forestales, ya que proporcionan una valiosa información sobre la intensidad y velocidad de propagación del fuego. El presente trabajo ha utilizado un vehículo aéreo no-tripulado (UAV) de ala fija (*eBee Classic*) con cámaras RGB y multiespectral para la estimación de tipos de combustible, según el modelo *Prometheus,* en Aragón (NE de España). A partir de imágenes multiespectrales se obtuvo el índice de vegetación *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), mientras que las imágenes RGB permitieron generar nubes de puntos 3D de muy alta resolución mediante técnicas de fotogrametría *Structure-From-Motion*, y extraer métricas de la estructura forestal. La verdad-terreno la conformaron los tipos de combustible *Prometheus* estimados en el campo en 82 parcelas forestales. Los test de Spearman y Dunn determinaron las variables más relevantes a incluir en los modelos predictivos, que fueron: (i) la altura de la vegetación en el percentil 50, (ii) la desviación estándar de las alturas, (iii) el porcentaje de retornos por encima de 4 m, y (iv) el NDVI promedio. Tras comparar los resultados de dos técnicas de clasificación de inteligencia artificial (*Support Vector Machine y Random Forest*), los mejores ajustes se obtuvieron con el modelo *Random Forest*, que alcanzó una precisión global del 66% (kappa=0,58) en la validación cruzada k-fold (k=10). Se obtuvieron mayores tasas de acierto en los tipos 1, 2 y 7 en comparación con los tipos 3 y 6. Los resultados muestran la capacidad de los UAVs con sensor multiespectral para la estimación de combustibles forestales en ambientes mediterráneos.

Palabras-clave: incendios forestales, ecosistemas mediterráneos, drones, Machine Learning.

1. INTRODUCCIÓN

Los espacios forestales constituyen uno de los ecosistemas de mayor valor del planeta, ya que albergan una gran biodiversidad (Brockerhoff et al., 2018) y son los principales reservorios de biomasa y carbono vegetal terrestre (Puletti et al., 2020), por lo que su preservación es crucial en el actual contexto del cambio climático. Una de las perturbaciones intrínsecas más comunes de los bosques son los incendios forestales, especialmente en los ambientes mediterráneos (Oliveira et al., 2012) debido a las características de su clima y a factores socio-económicos recientes, como el abandono de las áreas rurales y la creciente urbanización en la interfaz urbano-forestal (Jiménez-Ruano et al., 2017). Cuando se vuelven recurrentes, los incendios forestales pueden producir efectos negativos en el medio ambiente, como erosión del suelo, pérdida de biodiversidad y aumento en la emisión de gases de efecto invernadero. Para mitigar estos efectos, resulta necesario entender la conducta del fuego sobre una masa forestal que ayude a los gestores forestales a evaluar el daño en los ecosistemas y el riesgo en las poblaciones.

La materia orgánica viva o muerta disponible para la combustión en un incendio está representada por los combustibles forestales, que determinan el comportamiento y la propagación del fuego y pueden ser cuantificados para evaluar el riesgo de incendio (Ferraz et al., 2016). En términos generales, los tipos de combustible se agrupan por clases de vegetación con comportamiento similar al fuego, que dependen de su altura y densidad (Huesca et al., 2019). Existen diversas clasificaciones de tipos de combustible, muchos de ellos desarrollados en Estados Unidos, como los modelos de Rothermel (1972) y Albini (1976). El modelo Prometheus (Prometheus, 1999) adapta los tipos de combustible a ambientes mediterráneos (Riaño et al.,

2002) y considera la estructura del combustible como el principal elemento propagador del fuego. Comprende siete categorías para tres tipos principales de portadores de fuego: una para pastos, tres para arbustos y tres para árboles.

La identificación de los combustibles forestales ha sido tradicionalmente realizada mediante observación directa en trabajos de campo. Sin embargo, en las últimas décadas se ha demostrado la capacidad de la teledetección para estimar distintos atributos del bosque, como el vigor de la vegetación, la altura de los árboles o la densidad del dosel vegetal. En concreto, los sensores Light Detection and Ranging (LiDAR) han sido ampliamente utilizados, ya que permiten el modelado de variables estructurales del bosque (Montealegre et al., 2016) y la estimación de combustibles forestales (Domingo et al., 2020). Además, su integración con imágenes procedentes de sensores pasivos puede ayudar a mejorar la clasificación de los modelos de combustible (Marino et al., 2016; Domingo et al., 2020), gracias a la combinación de la información espectral de los sensores pasivos y la estructural de los datos LiDAR. En cambio, muy pocos estudios han usado vehículos aéreos no-tripulados (UAVs: Unmanned Aerial Vehicles) para identificar combustibles forestales, aun cuando los UAVs permiten el registro de información multiespectral y estructural relacionada con numerosos atributos forestales (Danielli et al., 2021). En concreto, los sensores multiespectrales utilizados en este trabajo posibilitan la captura de información espectral de la vegetación y la generación de nubes de puntos tridimensionales de muy alta densidad, a partir de un conjunto de imágenes superpuestas, tomadas desde múltiples puntos de vista (Puliti et al., 2015). Para ello se utilizan técnicas fotogramétricas Structure-From-Motion que están basadas en la fotogrametría tradicional (Messinger et al., 2016). Algunos trabajos han usado imágenes multiespectrales capturadas con UAVs para estimar combustibles forestales del dosel forestal en el SO de Estados Unidos (Shin et al., 2018), sensores LiDAR montados en UAVs para identificar combustibles en el NO de España (Fernández-Álvarez et al., 2019) y para estimar el riesgo de incendio en un bosque esclerófilo del SE de Australia (Hillman et al., 2021). Sin embargo, no existen hasta la fecha estudios centrados en la identificación de modelos específicos de combustible mediante el uso de UAVs.

En este contexto, el objetivo general del trabajo es evaluar el potencial de las imágenes capturadas mediante UAVs para identificar y clasificar tipos de combustible del modelo *Prometheus* en ambientes forestales mediterráneos, mediante la combinación de información estructural, proveniente de nubes de puntos tridimensionales generadas a partir de un sensor RGB, y de índices de vegetación, generados a partir de un sensor multiespectral. La hipótesis de partida es que la integración de ambas informaciones permite estimar variables de la estructura forestal, como la altura y la densidad, y del vigor de la vegetación, lo que capacita a esta técnica para identificar y clasificar los tipos de combustible.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y verdad-terreno

El estudio se ha llevado a cabo en 82 parcelas forestales de 15 m de radio circular y gran diversidad estructural, distribuidas en cinco sectores de la Comunidad Autónoma de Aragón, en el noreste de España (Figura 1). Concretamente, los sectores se localizaron en el entorno de Almudévar (12 parcelas) y Ayerbe (36 parcelas), en la provincia de Huesca; Uncastillo (11 parcelas) y Zuera (8 parcelas), en la provincia de Zaragoza; y Villarluengo (15 parcelas) en la provincia de Teruel. Los tipos de combustible *Prometheus* fueron estimados para cada parcela en el campo (Tabla 1) en dos estudios anteriores desarrollados por Montealegre *et al.* (2016), en el sector de Zuera, y por Domingo *et al.* (2020), en el resto de sectores, conformando la verdad-terreno para los modelos de clasificación. Durante los vuelos UAV se verificaron los tipos de combustible estimados en ambos estudios. Las parcelas se encuentran dominadas por pastizales, arbustos y bosques de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) con sotobosque dominado principalmente por *Quercus ilex* subsp. *rotundifolia*, *Quercus coccifera*, *Juniperus oxycedrus*, *Buxus sempervirens, Rosmarinus officinalis*, y *Thymus vulgaris*. Todos los sectores se caracterizan por un clima de tipo mediterráneo, con escasas e irregulares precipitaciones anuales, que se distribuyen en las estaciones equinocciales, y gradientes térmicos diarios y anuales elevados. En Almudévar y Zuera, en el área central del Valle del Ebro, las condiciones son más áridas, con precipitaciones anuales en torno a los 300 mm/año, veranos secos y muy calurosos e inviernos fríos. En los sectores de Ayerbe, Uncastillo y Villarluengo el clima mediterráneo adquiere un carácter más continentalizado, aunque la relativa cercanía a masas de agua hace aumentar la precipitación anual hasta los 500 mm/año, aproximadamente. Aquí los veranos son calurosos y secos y los inviernos muy fríos. En los cinco sectores se producen tormentas de carácter convectivo, especialmente en primavera y verano, que pueden ser más frecuentes e intensas en el Sistema Ibérico turolense (sector de Villarluengo) e ir acompañadas de aparato eléctrico con efectos en la masa forestal.

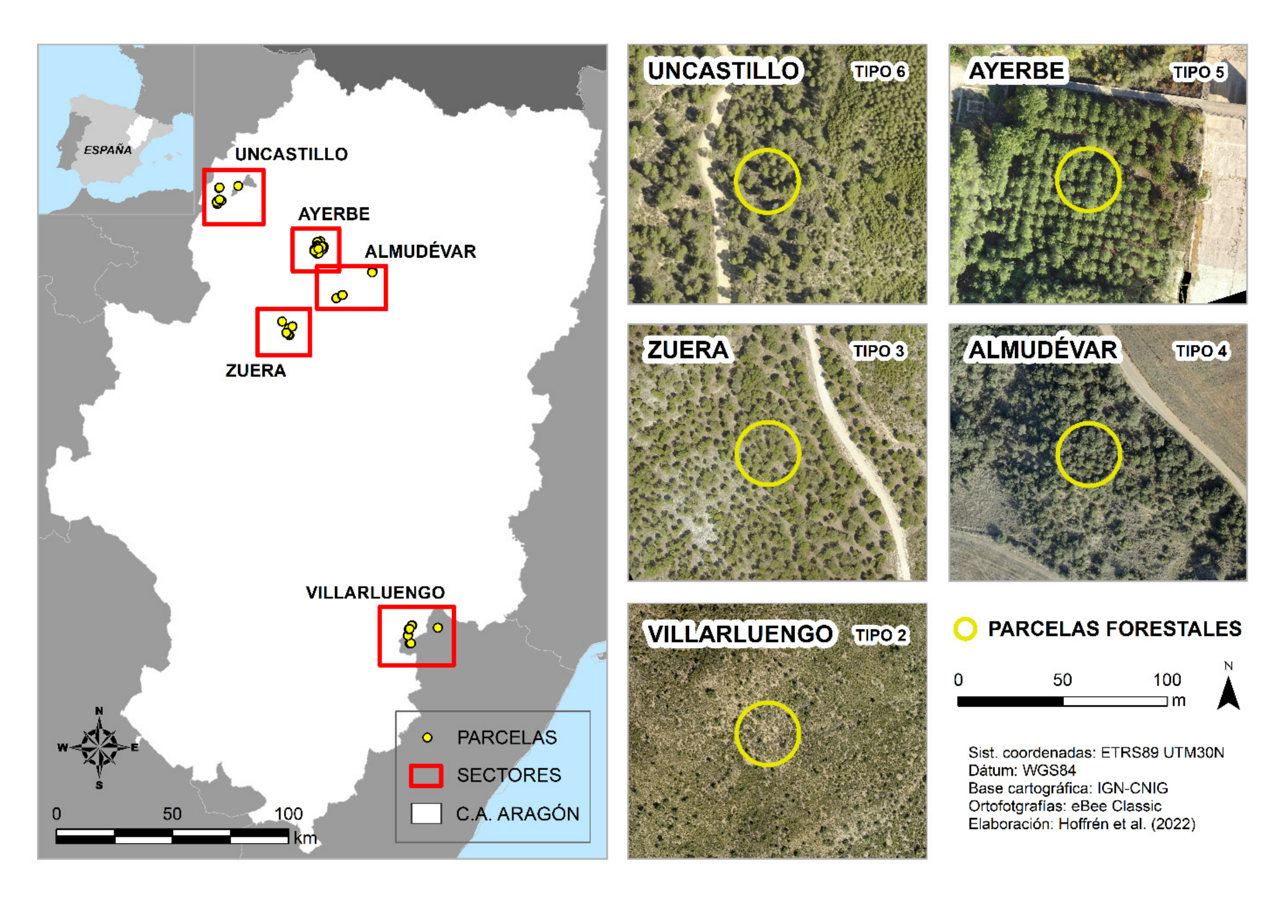


Figura 1. Localización de las parcelas de estudio en Aragón y ejemplos de parcelas de campo.

Tabla 1. Tipos de combustible definidos por la clasificación *Prometheus* y número total de parcelas de cada tipo.

Tipo de combus-tible	***Número total de parcelas***	***Principal portador del fuego***	***Cobertura***	***Altura promedio de los arbustos***	***Diferencia vertical entre arbus-tos y árboles***
1	10	Pastos	> 60% pastizal		
2	11	Arbustos	> 60% pastizal y < 50% árboles (> 4 m)	0,30 – 0,60 m	
3	8			0,60 – 2,00 m	
4	7			2,00 – 4,00 m	
5	10	Árboles	< 30% arbustos y > 50% árboles (> 4 m)		
6	13		> 30% arbustos y > 50% árboles (> 4 m)		> 0,5 m
7	23				< 0,5 m

2.2. Adquisición y procesado de datos UAV

Se organizaron 49 campañas de vuelo UAV sobre las 82 parcelas forestales entre junio y octubre de 2021. El total de imágenes individuales procesadas fue de 12.007. Se utilizó una unidad UAV de ala fija *eBee Classic* de SenseFly, equipada con dos sensores: RGB (cámara SONY WX de 18,2 MPx de resolución) y multi-espectral (sensor Sequoia con capacidad de registro en las bandas del verde, rojo, rojo extremo e infrarrojo cercano). En cada campaña se realizaron dos vuelos, uno por cada sensor, por lo que se contabilizaron un total de 98 vuelos. Todos ellos fueron automatizados mediante el programa *eMotion v3.5.0*. El UAV voló a una altura fija de 116,5 m sobre el terreno, con un ángulo de incidencia nadiral (90º) y con un solape entre

fotografías del 90% y 80% en la transversal y dirección de vuelo, respectivamente. Tales parámetros permitieron obtener una resolución espacial de 4 cm/px en las imágenes RGB y de 12 cm/px en las multiespectrales. Se registraron coordenadas “xy” y “z” en varios puntos de control (GCPs: *Ground Control Points*) de cada área de vuelo, a partir de una estación GNSS Leica Viva® GS15 CS10 de precisión submétrica, que permitieron la ortorrectificación geométrica posterior de las imágenes UAV.

Los datos adquiridos fueron procesados con el programa *Pix4Dmapper v4.5.6*. Las coordenadas locales de las imágenes UAV fueron georreferenciadas al sistema de referencia ETRS89 UTM 30N a partir de los GCPs de precisión submétrica registrados en el campo. Además, se utilizó el modelo geoidal EGM-96 como sistema de coordenadas vertical. Para cada área de vuelo se generó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*) (Ecuación 1; Rouse *et al.*, 1974), a partir de las imágenes multiespectrales, y las nubes de puntos tridimensionales de muy alta densidad con información “xy” y “z”, a partir de las imágenes RGB, utilizando procesos fotogramétricos *Structure-From-Motion*, implementados en el programa *Pix4Dmapper*. Se calculó un conjunto de estadísticos zonales a escala de parcela a partir de la información NDVI: mínimo, máximo, media, mediana y desviación estándar. Por su parte, las alturas (“z”) de la nube de puntos UAV fueron normalizadas utilizando la función “*normalize_height*” del paquete lidR (Roussel *et al.*, 2020) para entorno R v4.2.0 (R Core Team, 2022). Para ello, se usó como base el Modelo Digital de Elevaciones de 2 m de resolución espacial derivado de la segunda cobertura de datos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) del Instituto Geográfico Nacional. La nube de puntos normalizada permitió obtener un conjunto de métricas estructurales de la vegetación a escala de parcela utilizando el comando “*Cloudmetrics*” del programa FUSION/LDV v4.20 (McGaughey, 2021). Dichas métricas se dividieron en tres grandes grupos: relacionadas con la distribución de las alturas (percentiles de altura: P01, P05… P99), la variabilidad de las alturas (varianza, desviación estándar y coeficientes de variación de las alturas), y la densidad del dosel vegetal (porcentaje de retornos a diferentes umbrales de altura). De esta forma, cada parcela contó con un conjunto de variables espectrales (estadísticos NDVI) y estructurales (métricas de la nube de puntos) de la vegetación.

$$NDVI = (\mathrm{NIR} - \mathrm{R}) \ / \ (\mathrm{NIR} + \mathrm{R}) \qquad (1)$$

Donde “NDVI” es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, “NIR” es la banda del infrarrojo cercano y “R” es la banda del rojo.

2.3. Clasificación de los tipos de combustible *Prometheus* y validación de los modelos

Análisis preliminares mediante los test de Shapiro-Wilk y Anderson-Darling determinaron la ausencia de normalidad en los datos. Además, los test de Levene y de Fligner-Killeen revelaron que los datos no seguían el criterio de homogeneidad. Por tanto, la selección de las variables para la clasificación de los tipos de combustible se realizó usando dos aproximaciones para conjuntos de datos no-paramétricos: i) el coeficiente de correlación de Spearman (ρ), que determinó la fuerza y dirección de la relación entre los tipos de combustible y los datos UAV; y ii) el test de Dunn de comparaciones múltiples, que estableció las diferencias existentes por cada variable entre los distintos tipos de combustible forestal. La selección final de variables para su introducción en los modelos de clasificación estuvo conformada por una variable de cada grupo de métricas estructurales y de los estadísticos NDVI, con un elevado coeficiente de correlación de Spearman y una alta capacidad de diferenciar pares de tipos de combustible según el test de Dunn.

Se utilizó el paquete “caret” (Kuhn, 2008) en entorno R para probar el rendimiento para la clasificación de los tipos de combustible *Prometheus* de dos modelos predictivos no-paramétricos: Random Forest (RF) y Support Vector Machine (SVM), este último calculado tanto con *kernel* radial (SVM-R) como lineal (SVM-L). Los modelos fueron validados mediante los métodos de validación cruzada *leave-one-out* (LOOCV) y k-fold en grupos de 5 (k=5) y 10 (k=10) observaciones, realizando 10, 50 y 100 repeticiones en cada caso. Se trata de métodos de validación frecuentemente utilizados cuando los conjuntos de datos son de pequeño tamaño, con el objetivo de no reducir aún más la muestra (Andersen *et al.*, 2005). Finalmente, se seleccionó el modelo y el método de validación con ajustes más precisos en la clasificación de los tipos de combustible a partir de los coeficientes de precisión global “accuracy” y Kappa de Cohen (“kappa”), y la precisión del productor (“producer’s accuracy”) y del usuario (“user’s accuracy”) en las matrices de confusión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El coeficiente de correlación de Spearman (ρ) determinó las variables que mejor correlación presentaron con los tipos de combustible *Prometheus* (Tabla 2). Por grupos de métricas estructurales, las variables de la distribución de las alturas de la vegetación con mayores coeficientes de correlación fueron los percentiles de altura desde "Elev. P50" a "Elev. P99" (ρ>=0,75). Respecto al grupo de métricas relacionadas con la variabilidad de las alturas, la varianza ("Elev. variance") y la desviación estándar ("Elev. stddev") obtuvieron los coeficientes de correlación más elevados (ρ=0,83). Varias métricas de la densidad del dosel vegetal, como la desviación estándar, el coeficiente de variación, el máximo, la media, la mediana y la moda de las elevaciones por encima de 4 m lograron coeficientes de correlación elevados (p>0,70), del mismo modo que el porcentaje de retornos por encima de la elevación media (p=0,75) y el porcentaje de retornos por encima de 4 m (p=0,72). Las variables de los estadísticos derivados del NDVI obtuvieron coeficientes de correlación más bajos que las métricas estructurales, siendo las mejores el NDVI promedio (p=0,67), el mínimo (p=0,65) y la mediana (p=0,64).

Tabla 2. Variables más significativas según el coeficiente de correlación de Spearman por grupos de métricas estructurales y estadísticos NDVI.

Información	***Grupo***	***Variables***	***Coeficiente de correlación (p)***
Estructural	Distribución de las alturas	"Elev. P80", "Elev. P90", "Elev. P95"	0,76
		"Elev. P50", "Elev. P60", "Elev. P70", "Elev. P99"	0,75
	Variabilidad de las alturas	"Elev. stddev", "Elev. variance"	0,83
	Densidad del dosel vegetal	"Elev. strata > 4 m stddev"	0,78
		"Percentage of returns > mean"	0,75
		"Elev. strata > 4 m max"	0,74
		"Elev. strata > 4 m CV"	0,73
		"Percentage of returns > 4 m"	0,72
Espectral	Estadísticos NDVI	"NDVI mean"	0,67
		"NDVI min"	0,65
		"NDVI median"	0,64

El test de Dunn reveló las variables más significativas para diferenciar entre tipos de combustible a partir de la comparación entre los 16 pares de tipos *Prometheus* (e.g., 1–2, 1–3, 1–4, etc.) (Tabla 3). Numerosas métricas estructurales de la densidad del dosel vegetal, relacionadas con la elevación por encima de 4 m, fueron capaces de distinguir hasta 12 pares de tipos de combustible. Los percentiles de distribución de las alturas desde "Elev. P20" hasta "Elev. P95" distinguieron 10 pares (11 en el caso de "Elev. P99"), mientras que, del grupo de variabilidad de las alturas, el coeficiente de variación ("Elev. CV") distinguió 9 pares y la varianza ("Elev. variance") y la desviación estándar ("Elev. stddev") de las alturas consiguieron distinguir hasta 7 pares, los mismos que alcanzaron el promedio, el máximo y la mediana del NDVI. No hubo ninguna variable capaz de diferenciar entre los tipos 2–3 y 3–4, mientras que sólo una variable fue capaz de hacerlo entre los tipos 5–6 ("ndvi max") y 6–7 ("Elev. strata 0,6 – 2 m mode").

Atendiendo a los resultados obtenidos y con objeto de generar modelos parsimoniosos, las variables seleccionadas para su inclusión en los modelos de clasificación fueron las métricas estructurales "Elev. P50", del grupo de distribución de las alturas; "Elev. stddev", del grupo de variabilidad de las alturas; y "Percentage of returns > 4 m", del grupo de densidad del dosel vegetal; y la variable espectral "NDVI mean", de los estadísticos derivados del NDVI.

Tabla 3. Variables más significativas según el test de Dunn para distinguir pares de tipos de combustible *Prometheus*.

Número de pares significativos	***Variables***
12	"Percentage of returns > 4 m", "Elev. strata > 4 m max", "Elev. strata > 4 m mean", "Elev. strata > 4 m mode", "Elev. strata > 4 m median"
11	"Elev. P99", "All returns > 4 m"
10	"Elev. P20", "Elev. P25", "Elev. P30", "Elev. P40", "Elev. P50", "Elev. P60", "Elev. P70", "Elev. P75", "Elev. P80", "Elev. P90", "Elev. P95"
9	"Elev. CV", "Elev. L CV"
8	"Percentage of returns > mean", "Elev. strata 0,60 – 2 m max"
7	"Elev. variance", "Elev. stddev", "NDVI mean", "NDVI max", "NDVI median"

Los modelos de clasificación mostraron un mejor rendimiento con RF que con SVM. Asimismo, el método de validación con mejor ajuste se alcanzó mediante validación cruzada k-fold de 10 observaciones y 100 repeticiones. El modelo RF de mejor ajuste se parametrizó con 2 árboles de decisión ("mtry") en cada nodo, obteniendo un coeficiente accuracy de 66% (kappa=0,58). Por su parte, el modelo SVM-R logró un coeficiente accuracy de 58% (kappa = 0,48) con valor "gamma" de 0,60 y "coste" de 1, mientras que con SVM-L se consiguió un accuracy de 57% (kappa = 0,47) con valor "coste" de 1. Los ajustes obtenidos en este estudio muestran precisiones similares a los conseguidos por Domingo *et al.* (2020), quienes utilizaron variables procedentes de LiDAR aeroportado, combinado con información multiespectral, para clasificar tipos de combustible *Prometheus* en un ambiente mediterráneo similar, obteniendo precisiones globales similares con SVM-R (accuracy=59%) y más bajas con RF (accuracy=56%). Mayores precisiones alcanzaron Marino *et al.* (2016) para clasificar tipos de combustible del modelo de Albini en Canarias (accuracy=82%), y para los tipos del modelo específico de las Islas Canarias (accuracy=70%), aunque se aplicaron algoritmos de decisión basadas en las métricas LiDAR para cada tipo de vegetación.

La Tabla 4 muestra la precisión obtenida por tipos de combustible *Prometheus* con el mejor modelo de clasificación (RF) y método de validación (10-fold). Los tipos de combustible clasificados con mayor tasa de acierto fueron el 1, 2 y 7, mientras que la tasa de error fue elevada en el tipo 3, donde varias parcelas fueron incorrectamente clasificadas como tipos 1, 2 y 4, y en el tipo 6, donde hubo confusión con los tipos 5 y 7. Estos casos pueden explicarse por la ausencia de variables significativas que reportó el test de Dunn para diferenciar entre tipos 2–3, 3–4, 5–6 y 6–7. Además, en la Figura 2 se observa que la distribución de los valores de las variables de clasificación de los tipos 3 y 6 son similares a los del tipo 2 y 7, respectivamente. En general, la distribución de valores es muy diferente en los tres tipos de portadores principales de fuego (pasto, arbustos y árboles). Los valores del tipo de pasto (tipo 1) se caracterizan por una muy escasa distribución y variabilidad de las alturas, nulo porcentaje de retornos por encima de 4 m y bajos niveles promedios de NDVI. Los valores de los tipos arbustivos (tipos 2, 3 y 4) son algo mayores que los del pasto, pero igualmente bajos, aunque en el tipo 4 existe una mayor varianza en la distribución de las alturas y en el porcentaje de retornos por encima de 4 m, debido a la mayor densidad forestal que caracteriza a este tipo de combustible. En los tipos arbóreos (tipos 5, 6 y 7) los valores son elevados, con menor varianza en el tipo 5 por la ausencia de sotobosque, que se refleja en la escasa variabilidad de las alturas y en que la práctica totalidad de los retornos se sitúe por encima de 4 m. Esta heterogénea distribución de valores entre los tres tipos de portadores de fuego explicaría la ausencia de errores de clasificación que existe entre ellos, tal y como se observa en la Tabla 4, excepto en dos casos: el tipo 3, donde algunas parcelas fueron clasificadas como tipo 1; y el tipo 4, que tuvo confusión con el tipo 7. Este último caso es habitual y ha sido reportado en estudios anteriores (e.g., Domingo *et al.* 2020), debido a que ambos tipos se caracterizan por una elevada densidad de vegetación y de continuidad vertical de los estratos que dificulta su diferenciación, incluso en el propio campo. Sin embargo, ninguna parcela de tipo 2 fue clasificada por error en los tipos de pasto y de árboles, y tampoco se reportó confusión en los tipos 5 y 6 con los tipos de pasto y de arbustos. En este sentido, los resultados del modelo sugieren que la unidad UAV ha sido capaz de diferenciar satisfactoriamente entre los tipos de combustible y, especialmente, entre los principales portadores de fuego del modelo *Prometheus*.

Tabla 4. Matriz de confusión del mejor modelo de clasificación RF por tipos de combustible *Prometheus*.

Tipo de combustible	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*Producer's accuracy*	*User's accuracy*
1	**99**	0	10	0	0	0	0	99,00 %	90,83 %
2	0	**89**	27	4	0	0	0	80,91 %	74,17 %
3	1	11	**30**	12	0	0	0	37,50 %	55,56 %
4	0	10	12	**44**	0	0	10	62,86 %	57,89 %
5	0	0	0	0	**58**	22	4	58, 00%	69,05 %
6	0	0	0	0	18	**33**	37	27,50 %	37,50 %
7	0	0	1	10	24	65	**189**	78,75 %	65,40 %

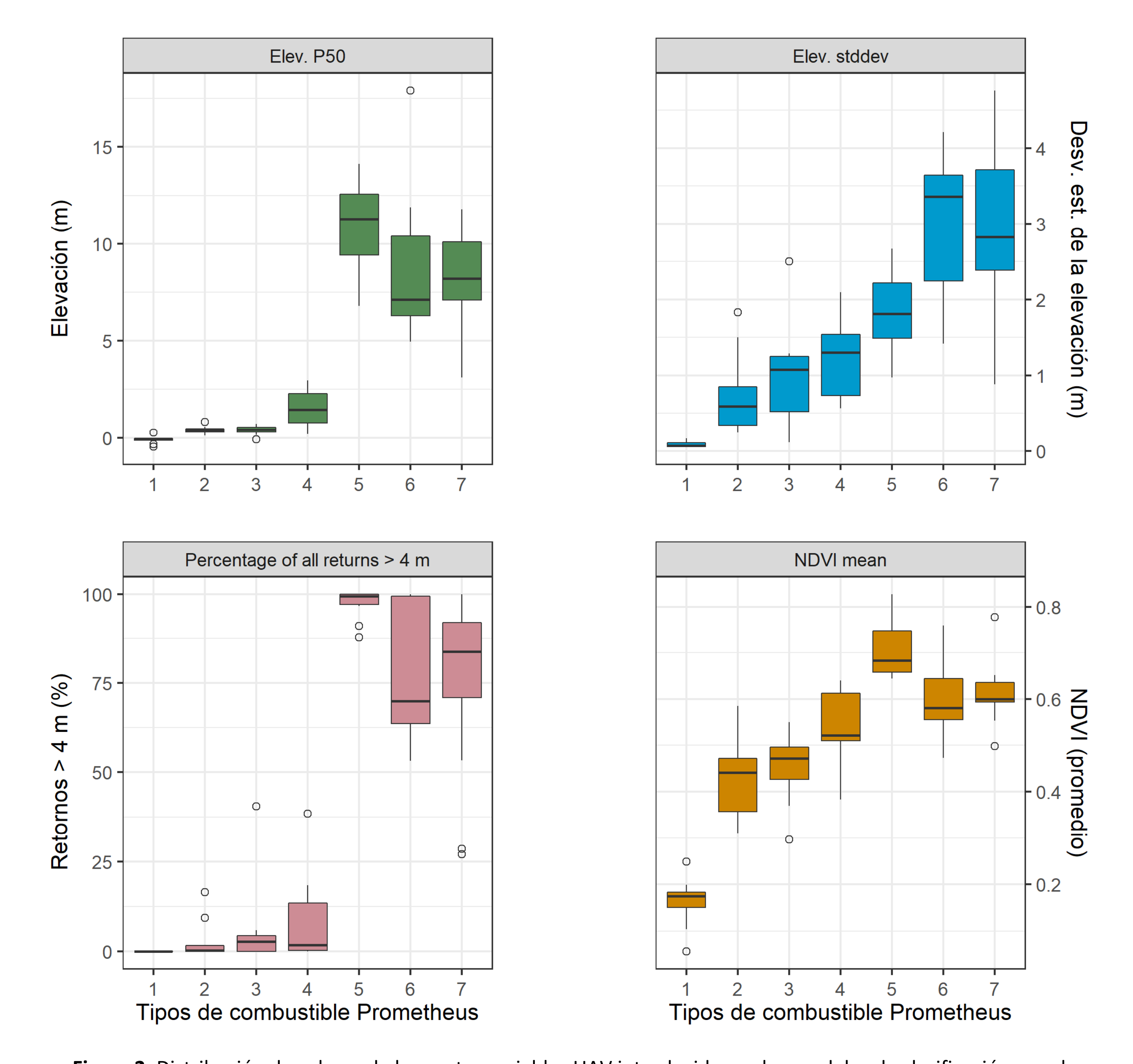


Figura 2. Distribución de valores de las cuatro variables UAV introducidas en los modelos de clasificación para la identificación de los tipos de combustible *Prometheus*.

4. CONCLUSIONES

La identificación de combustibles forestales constituye un paso importante para la mitigación de los efectos negativos de los incendios, ya que permite a los gestores conocer la propagación y la intensidad que presentaría el fuego sobre una masa forestal para, en definitiva, poder aplicar medidas preventivas. En este estudio, se han identificado tipos de combustible del modelo *Prometheus* mediante UAV con sensores RGB y multiespectral en 82 parcelas forestales localizadas en ambiente mediterráneo. Los resultados obtenidos indican que la utilización de sensores RGB y multiespectrales montados en UAVs es apta para identificar y clasificar los tipos de combustible *Prometheus*, gracias a su capacidad de obtención de variables estructurales y espectrales. El sensor multiespectral ha permitido capturar el vigor de la vegetación a partir del índice NDVI, pero futuros estudios deberían de considerar la inclusión de otros índices espectrales válidos, como EVI, SAVI, NDMI o transformaciones Tasseled-Cap. Por su parte, la obtención de nubes de puntos tridimensionales de muy alta resolución a partir de imágenes RGB ha posibilitado la extracción de métricas estructurales de la vegetación de manera satisfactoria. En este sentido, un siguiente paso sería valorar la capacidad de los sensores LiDAR a bordo de UAVs para la mejora de la clasificación de los tipos *Prometheus*, dada su capacidad de penetración en el dosel vegetal. Ello permitiría capturar mayor cantidad de información del sotobosque, lo que podría ser de ayuda para reducir la confusión entre tipos de combustible y alcanzar mayores precisiones globales. Es necesario seguir investigando para comprender mejor las capacidades y limitaciones de estos prometedores instrumentos, pero los resultados de este estudio permiten arrojar luz sobre la utilidad de sensores montados en UAVs para identificar combustibles forestales y, por tanto, para contribuir con éxito a prevenir los efectos negativos de los incendios forestales.

5. BIBLIOGRAFÍA

Albini, F. (1976). Estimating wildfire behavior and effects. *USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station*, General Technical Report INT-30, 92 pp.

Andersen, H.E., McGaughey, R.J., Reutebuch, S.E. (2005). Estimating forest canopy fuel parameters using LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 94(4), 441–449. https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.013.

Brockerhoff, E.G., Barbaro, L., Castagneyrol, B. *et al.* (2018). Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity Conservation,* 26, 3005–3035. https://doi.org/10.1007/s10531-017-1453-2.

Danielli, R., Toscano, P., di Gennaro, S.F., Matese, A. (2021). Recent advances in unmanned aerial vehicle forest remote sensing –A systematic review. Part I: A general framework. *Forests,* 12(3), 327, https://doi.org/10.3390/f12030327.

Domingo, D., de la Riva, J., Lamelas, M.T., García-Martín, A., Ibarra, P., Echeverría, M., Hoffrén, R. (2020). Fuel type classification using airborne laser scanning and sentinel 2 data in Mediterranean forest affected by wildfires. *Remote Sensing*, 12(21), 1–22. https://doi.org/10.3390/rs12213660.

Fernández-Álvarez, M., Armesto, J., Picos, J. (2019). LiDAR-based wildfire prevention in WUI: The automatic detection, measurement and evaluation of forest fuels. *Forests,* 10, 148. https://doi.org/10.3390/f10020148.

Ferraz, A., Saatchi, S., Mallet, C., Meyer, V. (2016). Lidar detection of individual tree size in tropical forests. *Remote Sensing of Environment*, 183, 318–333. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2016.05.028.

Hillman, S., Wallace, L., Lucieer, A., Reinke, K., Turner, D., Jones, S. (2021). A comparison of terrestrial and UAS sensors for measuring fuel hazard in a dry sclerophyll forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 95, 102261. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102261.

Huesca, M., Riaño, D., Ustin, S.L. (2019). Spectral mapping methods applied to LiDAR data: Application to fuel type mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 159–168. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.08.020.

Jiménez-Ruano, A., Rodrigues, M., de la Riva, J. (2017). Understanding wildfires in mainland Spain. A comprehensive analysis of fire regime features in a climate-human context. *Applied Geography* 89*,* 100–111. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.10.007.

Kuhn, M. (2008). Building predictive models in R using the caret package. *Journal of Statistical Software,* 28(5), 1–26. https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05.

Marino, E., Ranz, P., Tomé, J.L., Noriega, M.Á., Esteban, J., Madrigal, J. (2016). Generation of high-resolution fuel model maps from discrete airborne laser scanner and Landsat-8 OLI: A low-cost and highly updated methodology for large areas. *Remote Sensing of Environment*, 187, 267–280. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.020.

McGaughey, R.J. (2021). FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization V.4.20. *USDA Forest Service*. Washington DC, USA.

Messinger, M., Asner, G., Silman, M. (2016). Rapid assessments of Amazon forest structure and biomass using small unmanned aerial systems. *Remote Sensing*, 8, 615, https://doi.org/10.3390/rs8080615.

Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., de la Riva, J., García-Martín, A., Escribano, F. (2016). Use of low point density ALS data to estimate stand-level structural variables in Mediterranean Aleppo pine forest. *Forestry*, 89, 373–382. https://doi.org/10.1093/forestry/cpw008.

Oliveira, S., Oehler, F., San Miguel-Ayanz, J., Camia, A., Pereira, J.M.C. (2012). Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest. *Forest Ecological management,* 275, 117–129. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.003.

Prometheus (1999). *Management techniques for optimization of suppression and minimization of wildfires effects. System validation*. European Commission, DG XII, ENVIR & CLIMATE, Contract Number ENV4–CT98–0716. European Commission. Luxembourg.

Puletti, N., Grotti, M., Ferrara, C., Chianucci, F. (2020). Lidar-based estimates of aboveground biomass through ground, aerial, and satellite observation: a case study in a Mediterranean forest. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(4), 4501. https://doi.org/10.1117/1.jrs.14.044501.

Puliti, S., Olerka, H., Gobakken, T., Naesset, E. (2015). Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing*, 7, 9632–9654, https://doi.org/10.3390/rs70809632.

R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*. Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Palacios-Orueta, A., Bastarrica, A. (2002). Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research,* 32, 1301–1315. https://doi.org/10.1139/x02-052.

Rothermel, C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. *Research Papers, INT-115.* Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS-1 Symposium NASA*, NASA SP-351, Washington DC, 309–317.

Roussel, J.R., Auty, D., Coops, N.C., Tompalski, P., Goodbody, T.R.H., Sánchez-Meador, A., Bourdon, J.F., de Boissieu, F., Achim, A. (2020). lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112061. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061.

Shin, P., Sankey, T., Moore, M.M., Thode, A.E. (2018). Evaluating unmanned aerial vehicle images for estimating forest canopy fuels in a Ponderosa pine stand. *Remote Sensing,* 10, 1266. https://doi.org/10.3390/rs10081266.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 325-334

Aportaciones de los servicios ecosistémicos culturales a la calidad de vida urbana: el caso de la ciudad de Murcia

E.J. Illán-Fernández[1], G. Krsnik[2]

[1] *Departamento de Geografía, Universidad de Murcia. C. Santo Cristo, 30.001 Murcia.*
[2] *Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya. Crta. Sant Llorenç de Morunys, km 2, 25.280 Solsona.*

emiliojose.illan@um.es, *goran.krsnik@ctfc.cat*

RESUMEN: Las áreas verdes urbanas suponen la forma más esencial de estar en contacto con la naturaleza para la mayor parte de la población mundial, concentrada principalmente en las ciudades. Los servicios ecosistémicos aportan una serie de beneficios a los seres humanos, como la purificación del aire, la regulación de la temperatura o la recreación. Sin embargo, el rápido desarrollo de las áreas urbanas impide una provisión sostenible de estos servicios ecosistémicos. El acceso a tales beneficios, proporcionados por las áreas verdes de las ciudades, son percibidos cada vez más como un factor crucial para la calidad de vida de sus habitantes. Además, su papel estratégico para hacer frente a las consecuencias del cambio global y mitigar sus efectos es considerado como necesario. Se ha analizado la situación actual, a nivel de barrio, en la ciudad de Murcia (España) y para ello, se han evaluado algunos de estos beneficios proporcionados por los servicios ecosistémicos urbanos, concretamente los servicios culturales: recreación, valor psicológico, valor estético, valor social y sentido de lugar. Los resultados muestran como la provisión total en cuanto a servicios ecosistémicos culturales no es homogénea en el casco urbano de Murcia, sino que se ha visto influenciada por la localización y desarrollo de los barrios, con una dicotomía norte-sur. En definitiva, la inclusión y mejora de los servicios ecosistémicos en la ordenación territorial resulta esencial para conseguir un desarrollo urbano más sostenible.

Palabras-clave: servicios ecosistémicos culturales, verde urbano, sostenibilidad, bienestar humano.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, dos tercios de la población europea vive en ciudades. La urbanización y la densificación de los núcleos de población han disminuido considerablemente la superficie que las zonas verdes, no edificadas o naturales ocupan dentro de las ciudades (WHO, 2017). Sin embargo, las infraestructuras verdes son consideradas un componente esencial en cada ciudad, pues determinan la calidad de la vida urbana (Russo et al., 2018). Dentro de una realidad espacial tan compleja como en una ciudad, donde los procesos geográficos vienen determinados principalmente por los componentes socio-económicos creados y simulados en función de las necesidades de los habitantes, las zonas verdes urbanas resultan ser unas islas dentro del continuo urbano donde el componente natural es el dominante. La existencia de estos espacios es importante, ya que proveen un gran abanico de servicios, imprescindibles para la población, que un espacio artificial no es capaz de proveer, mejorando así el bienestar humano. Estos servicios son los conocidos como servicios ecosistémicos, que pueden ser definidos como aquellos beneficios proporcionados a la sociedad por parte de un tipo de ecosistema específico, siendo las zonas verdes urbanas uno de ellos (MEA, 2005). Los estudios de los servicios ecosistémicos forman parte de una corriente científica relativamente reciente, cuyo objetivo es gestionar el espacio geográfico de una manera sostenible, maximizando la provisión de éstos evitando riesgos medioambientales (McDonough et al., 2017).

Los servicios ecosistémicos culturales (SEC) forman parte de un grupo de servicios que un espacio puede proporcionar, aunque suelen ser los menos estudiados y definidos dada su abstracción y dificultad de concreción (Cheng et al., 2019). Así pues, los SEC son aquellos servicios que proporcionan beneficios a las personas de forma no material y que se obtienen de los ecosistemas a través de un proceso de enriquecimiento intelectual, del desarrollo cognitivo, de la reflexión, de la recreación, de las relaciones sociales o de los valores estéticos, entre otros (Gómez-Baggethun, E. et al., 2013; Rall et al., 2017). En comparación con otros servicios, se les percibe como “intangibles” e “invisibles”, difíciles de evaluar cuantitativamente debido a que sus categorías son consideradas poco específicas, con una tendencia al solapamiento, y con carácter

subjetivo y polémico (Pleininger et al., 2013; Mao et al., 2020). A pesar de ello, su integración en las políticas sostenibles es imprescindible, ya que proporcionan una imagen completa sobre la realidad espacial existente. Asimismo, las sociedades industrializadas valoran cada vez más estos servicios culturales puesto que la salud mental y física, igual que la integración social e identidad, están fuertemente relacionados con los servicios medioambientales (Milcu et al., 2013).

En definitiva, la cuantificación y la representación espacial de la provisión de servicios ecosistémicos es el primer paso hacia un estudio exhaustivo sobre la calidad de la vida urbana, así como de la importancia de las zonas verdes urbanas para el bienestar humano (Bagstad et al., 2014). La inclusión de los beneficios proveídos por la misma ciudad en estrategias de la planificación urbana, desarrollo urbanístico e intervenciones de reurbanización es imprescindible para conseguir un espacio sostenible y cómodo para vivir (Badiu et al., 2016; Žlender y Gemin, 2020). Por este motivo, un estudio que analiza la provisión actual de los SEC por barrios es un punto de partida para intentar detectar las diferentes características que tiene el verde urbano y poner de manifiesto posibles intervenciones que se deberían llevar a cabo para mejorar dicha provisión.

En este contexto, la ciudad de Murcia es un ejemplo de una ciudad de tamaño medio donde su desarrollo urbanístico a lo largo de la historia ha sido la causa de una distribución espacial irregular de las zonas verdes, hasta ahora poco estudiadas, con la necesidad de tenerlas en cuenta a la hora de tomar decisiones medioambientales. Por esta razón, el objetivo de este estudio es analizar la provisión de los SEC de las zonas verdes urbanas en los 28 barrios del tejido urbano continuo, partiendo de la cuantificación de indicadores de los SEC, obteniendo valores de provisión de servicios y realizando un análisis geoespacial con el fin de analizar el bienestar humano y las aportaciones de los SEC para conseguir el mismo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El municipio de Murcia se localiza en el sureste de España, dentro de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, y posee una población de 460.300 habitantes (2021), siendo el séptimo municipio con mayor población del país.

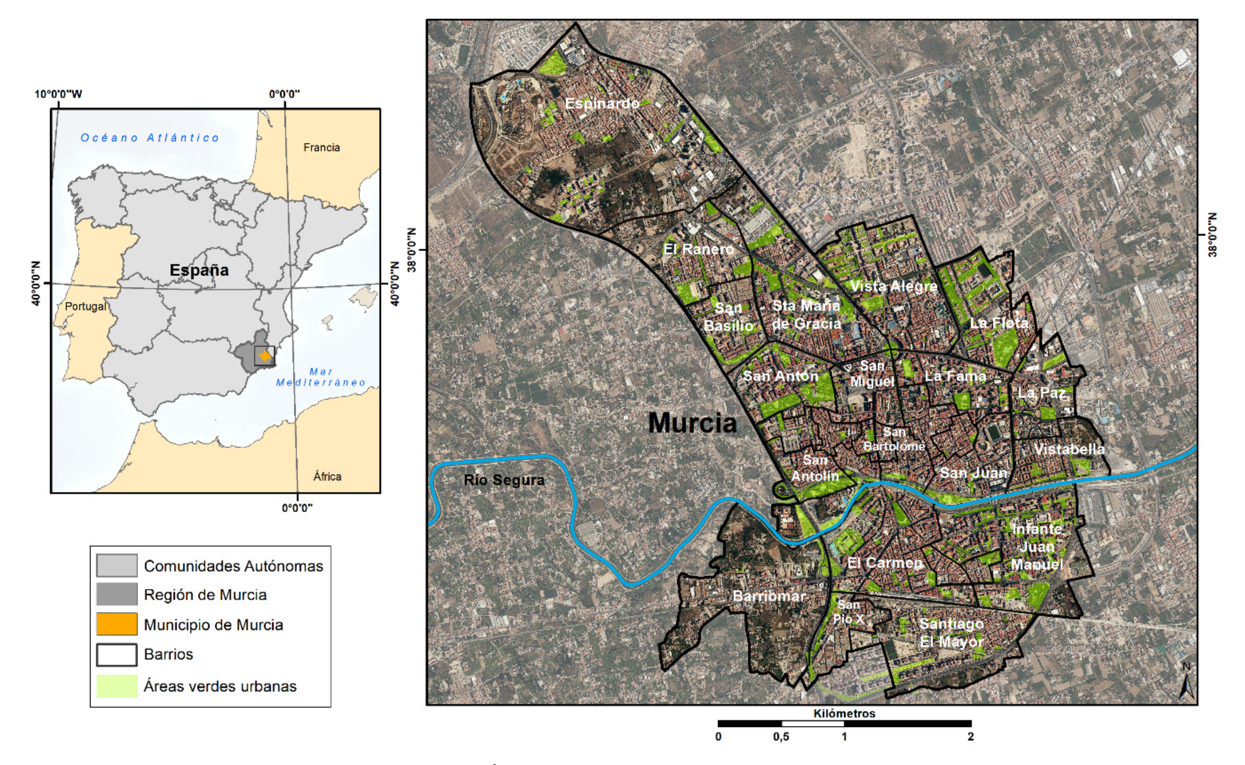


Figura 1. Área de estudio: ciudad de Murcia.

El área analizada se corresponde con el casco urbano principal, que alberga el 37,5% de la población municipal, estando el resto repartida en pedanías que no son administrativamente consideradas como parte de la ciudad, aunque se encuentren conurbados. Debido a esta dispersión de la población en otros núcleos,

se han seleccionado exclusivamente los 28 barrios en los que se divide oficialmente la ciudad como área de estudio (Figura 1), con una superficie total de 34,5 Km^2.

Se trata de una ciudad de tamaño mediano que ha sido influenciada por diversos desarrollos urbanos a lo largo de su historia, lo que ha generado notables diferencias, dentro de los límites del casco urbano principal, debido a diversos planes de expansión. Desde el origen de la ciudad en el siglo IX, la estructura urbana se ha visto influenciada por el curso del río Segura y la huerta circundante, propiciando un crecimiento en el eje sur-norte. La ciudad, además, posee particularidades propias de una ciudad mediterránea de origen medieval: una muy elevada densidad poblacional (Dijkstra y Poelman, 2012) con 4985 habitantes/Km^2, escasas y reducidas áreas verdes en la zona central y donde su dependencia con respecto a los servicios ecosistémicos se suele dar en las zonas de más reciente construcción.

2.2. Metodología

Los datos empleados en este trabajo han sido proporcionados por la Concejalía de Urbanismo del Ayuntamiento de Murcia, los cuales se encuentran disponibles al público previa petición. Toda la información ha sido procesada y mapeada mediante ArcGIS 10.8 siguiendo el siguiente flujo de trabajo (Figura 2).

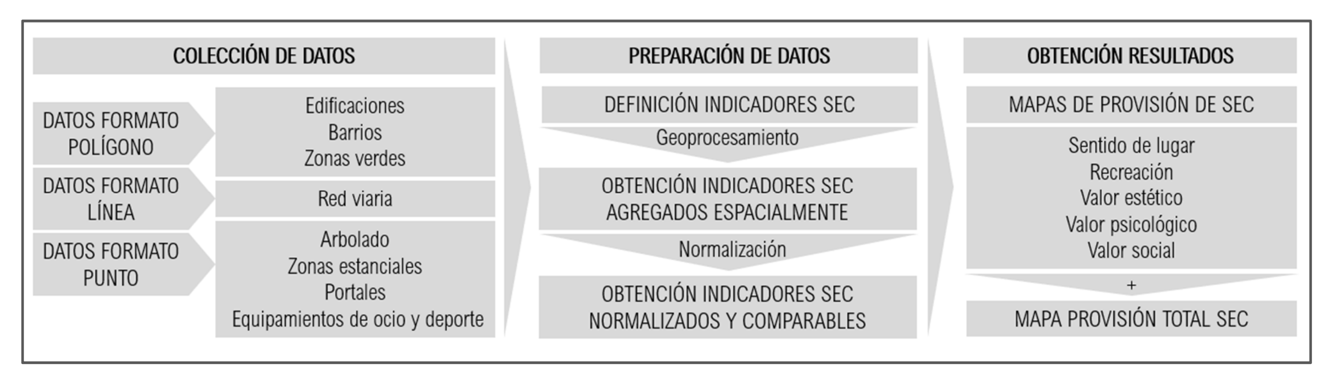


Figura 2. Flujo de trabajo.

Finalmente, se ha realizado una preparación de la información previa al análisis, eliminando y modificando errores en la medida de lo posible: corrección de los fallos de localización, creación de nuevos polígonos/líneas, depuración de información obsoleta, etc. A su vez, se han descartado los datos incluidos en las fuentes de información cuyo contenido no se ajustaba con el propósito de este trabajo. Así, por ejemplo, de las zonas verdes se han excluido aquellas donde los peatones no tienen acceso y que estaban catalogadas como tal (medianas, rotondas, raquetas, etc.) además de falsas zonas verdes (plazas duras). Por último, en cuanto al arbolado, las especies de baja altura (arbustos, plantas decorativas, etc.) han sido descartadas y en términos de equipamiento deportivo, las grandes pistas deportivas no han sido tenidas en cuenta.

2.2.1 Servicios ecosistémicos culturales e indicadores

Debido a la gran cantidad de beneficios que pueden aportar las áreas verdes urbanas, y teniendo en cuenta otros análisis (Egoh, B. et al, 2012; Ko y Son, 2018), los servicios culturales que se van a emplear en este estudio se encuentran resumidos en la Tabla 1. Estos indicadores se corresponden con aquellos que se emplean con mayor frecuencia (La Rosa et al., 2016; Larondelle y Haase, 2013; Zwierzchowska et al., 2018).

Tabla 1. Indicadores culturales de los servicios ecosistémicos urbanos analizados.

Servicio Ecosistémico	***Indicador***	***Unidad***	***Peso***
Sentido de lugar	Área verde por habitante	M^2/habitante	0.2
Recreación	Distancia a área verde (>1 Ha) más próxima desde el portal de la vivienda	Metros	0.2
Valor psicológico	Distancia desde la fachada de la vivienda hasta el árbol más próximo	Metros	0.2
Valor estético	Cantidad de arbolado viario	Número	0.2
Valor social	Cantidad de equipamientos sociales por Km^2	Número	0.2

Cada servicio ecosistémico viene definido por un indicador, elegido en función de la disponibilidad de datos espaciales. Se han considerado cada uno de los servicios como igualmente relevantes, por lo que se le ha asignado el mismo peso a todos ellos.

Sentido de lugar

El sentido de lugar es un concepto utilizado generalmente para describir a aquellas particularidades que hacen que un lugar sea especial o único, pues estos generan una serie de sentimientos de apego o pertenencia sobre las personas (Cheng et al., 2019; Hernández-Morcillo, M. et al., 2013; Williams y Stewart, 1998) que los hacen destacar. Estos sentimientos pueden proporcionar efectos positivos sobre el bienestar humano, tanto físico como psicológico, además de mejorar la conservación de la biodiversidad (Hausmann, A. et al, 2016). En este caso, y al no tratarse de un concepto cerrado, se ha empleado con el objetivo de conocer el ratio de espacio verde por habitante de cada barrio, pues la existencia de plazas, parques o jardines suele ser empleada por los habitantes como método de localización, además de facilitar un dato sobre la necesidad de mejoras en los mismos.

Recreación

Las facilidades que aportan los ecosistemas urbanos en términos de recreación, como jugar, descansar o la realización de ejercicio físico, son quizás uno de los servicios ecosistémicos urbanos que mayor valor supone para la ciudadanía (Bolund y Hunhammar, 1999), ya que los grandes espacios naturalizados suelen ser escogidos por la población para pasar su tiempo libre debido, entre otros motivos, por las características naturales del entorno (Bjerke et al., 2006; Fischer et al., 2018). Teniendo en cuenta que el aspecto más valorado es la disponibilidad de espacio, es decir, que el tamaño influye a la hora de realizar cualquier actividad (Gozalo et al., 2019; Schipperijn et al., 2013), se ha optado por seleccionar únicamente aquellos espacios verdes con una superficie superior a 1 Ha (Grunewald et al., 2017) y se ha medido la distancia desde el portal de cada una de las viviendas del área de estudio hacia la más cercana.

Valor psicológico

El efecto del arbolado sobre la salud mental de las personas ha sido demostrado en numerosos estudios (Beyer et al., 2014; Bratman et al., 2019; Kardan et al., 2015; Soga et al., 2021). En ellos, se enfatiza cómo el arbolado viario juega un papel fundamental en la reducción del estrés y la ansiedad, el aumento de la concentración o su relación con la mejoría de las condiciones de pacientes hospitalizados (Ulrich, 1984; McDonald et al, 2017), entre otros efectos. Con el objetivo de conocer la situación al respecto, se ha decidido mediar la cercanía de las viviendas con respecto a los árboles situados en calles y avenidas. Así, mediante el centroide de cada manzana de la ciudad (1804 puntos), se ha elaborado una interpolación con el método de Kriging con las distancias de los centroides al arbolado más próximo, consiguiendo una aproximación a nivel de manzana de la situación real.

Valor estético

La presencia de vegetación en áreas urbanas es considerada, por gran parte de la población (Daniel et al., 2012; Vesely, 2012), como un realce de la belleza y, por ende, aumenta el atractivo del entorno más cercano (Chiesura, 2004; Rašković y Decker, 2015; Zhang et al., 2007). Para medir este valor, se ha aplicado un área de influencia de 15 metros a cada lado de la red viaria del área de estudio, pues tras sucesivas comprobaciones, ha sido el tamaño idóneo para que el arbolado de las calles y plazas fuera seleccionado. De esta forma, se ha elaborado un mapa de calor de esta variable para conocer la localización e influencia sobre el paisaje arquitectónico.

Valor social

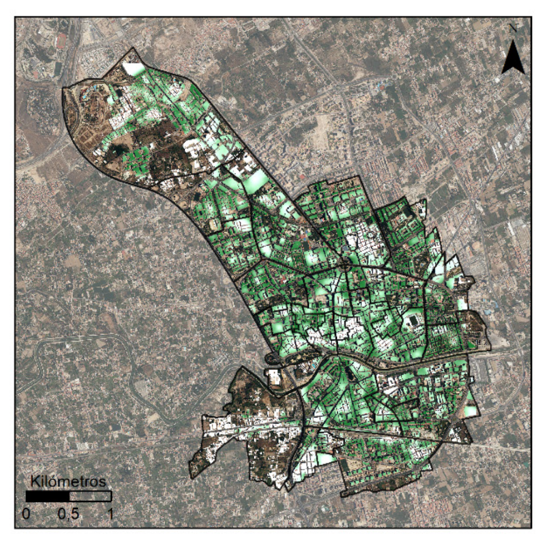
Las áreas verdes urbanas y zonas con vegetación son más propensas a ser usadas por los habitantes de una ciudad y, con ello, aumentar la interacción y las relaciones sociales (Enssle y Kabisch, 2020; Sugiyama et al., 2008). Este valor social de las áreas verdes se ve influenciado, principalmente, por el establecimiento en ellas de instalaciones que facilitan los vínculos sociales. La ubicación de estos está motivada por los beneficios que aportan los entornos naturales, como el frescor, una menor contaminación y ruido o la sombra. Por ello, para su cálculo, se han escogido los equipamientos de estancia (bancos, asientos), deportivos (calistenia, áreas de entrenamiento, espacios biosaludables) e infantiles (columpios, juegos infantiles, etc.) cuya ubicación se encuentre dentro de un área verde o a una distancia de como máximo 5 metros al árbol más cercano.

Por último, los mapas alcanzados para cada indicador han sido normalizados (0-1) para poder procesarlos de manera conjunta. Se ha obtenido un mapa final mediante la suma de los índices anteriores y el

resultado final también ha sido estandarizado, donde el valor 0 corresponde con píxeles donde no se suministra ninguno de los servicios ecosistémicos analizados mientras que el valor 1 se corresponde con el máximo nivel de suministros dentro del área de estudio.

3. RESULTADOS

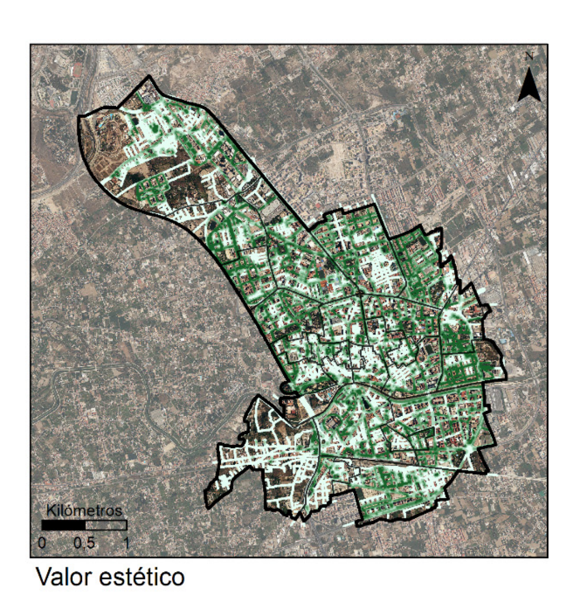
Los resultados obtenidos muestran la existencia de diferencias apreciables según el barrio. Pese a que el objetivo es conocer la situación con respecto a la provisión de los SEC establecidos según cada uno de ellos, algunos valores han podido ser calculados a un nivel más detallado (Figura 3), como los de recreación y psicológico (nivel de vivienda) o el valor estético (nivel de calle). No obstante, los resultados alcanzados en estas métricas han sido, posteriormente, calculados a nivel de barrio mediante sus valores medios para su comparación.



Valor psicológico

Kilómetros
0 0,5 1

Recreación



Valor estético

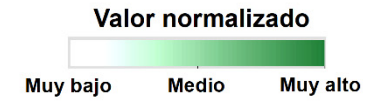


Figura 3. Índices obtenidos a nivel local (calle y vivienda). Fuente: elaboración propia.

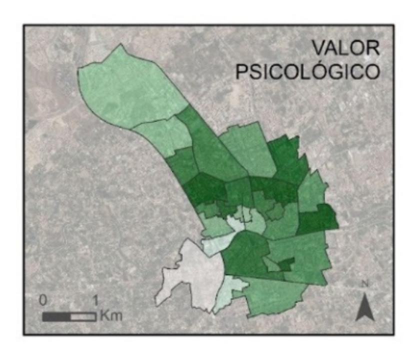
Así, se observa cómo la distribución de la provisión de los diferentes tipos de SEC no es homogénea dentro de los barrios, principalmente en los valores estético y psicológico, pues son los que sufren una mayor dependencia con respecto al arbolado viario. A simple vista, es posible percibir cómo el valor de estos SEC depende del modelo de desarrollo urbanístico empleado, pues la parte central de los barrios muestran una provisión más baja con respecto a la situada en sus bordes. Este hecho es debido a que, generalmente, la división administrativa se ha realizado utilizando avenidas o calles más amplias que las que conforman cada

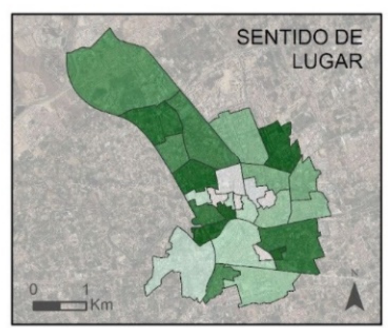
barrio. Estas vías suelen ser ampliaciones de antiguas entradas a la ciudad, bulevares o alamedas creadas durante del siglo XIX al expandirse la ciudad y que se encontraban arboladas. De esta forma, los resultados muestran una mayor provisión en torno a estos grandes ejes (Calle Floridablanca, Avda Juan Carlos I, Avda Juan de Borbón).

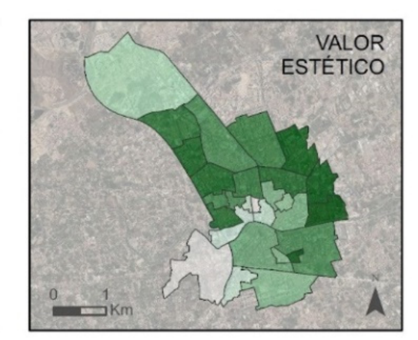
Sin embargo, la distribución espacial interna de la provisión de los SEC de los barrios fluctúa, en numerosas ocasiones, de forma drástica, mostrando una realidad que una media global del barrio no es capaz de representar de forma fidedigna. En este sentido, hay casos donde la homogeneidad es dominante (Barriomar, Ntra Señora de la Fuensanta, Vistabella, San Bartolomé), pero en otros predomina la disparidad (Vistalegre, Espinardo, San Pio X), la cual puede ser achacada principalmente a la densificación. De esta forma, se observa como en aquellas áreas donde se produce una mayor concentración de población, la existencia de calles estrechas y en definitiva, una ordenación del territorio más caótica, arroja como resultado un menor nivel de provisión.

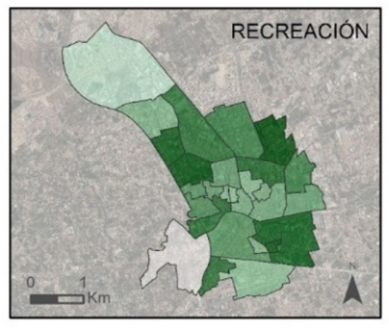
No obstante, es común encontrar diferencias internas en cualquier análisis, especialmente teniendo en cuenta que el tamaño de los barrios varía considerablemente. Como en la mayor parte de las ciudades europeas mediterráneas, la zona central se caracteriza por poseer un entramado urbano no planificado, con calles sinuosas y de corto recorrido, y donde los barrios que lo conforman son más reducidos. Por contra, al alejarse del centro, el tamaño de los barrios va en aumento, debido a una mayor y mejor planificación territorial. Este hecho, junto con otras variables, son las que finalmente influyen en el resultado alcanzado.

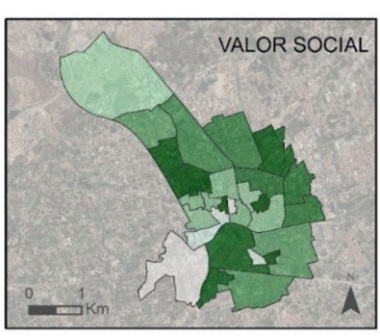
En la Figura 4 aparecen representados todos los SEC analizados, así como la provisión total de los SEC en función del barrio. Las diferencias existentes son fruto de la suma de cada uno de los indicadores, dando como resultado una variabilidad espacial en términos de provisión. Si bien la mayoría de los barrios cambian sus valores según el SEC, algunos de ellos permanecen en los niveles altos y bajos, independientemente de los datos evaluados.











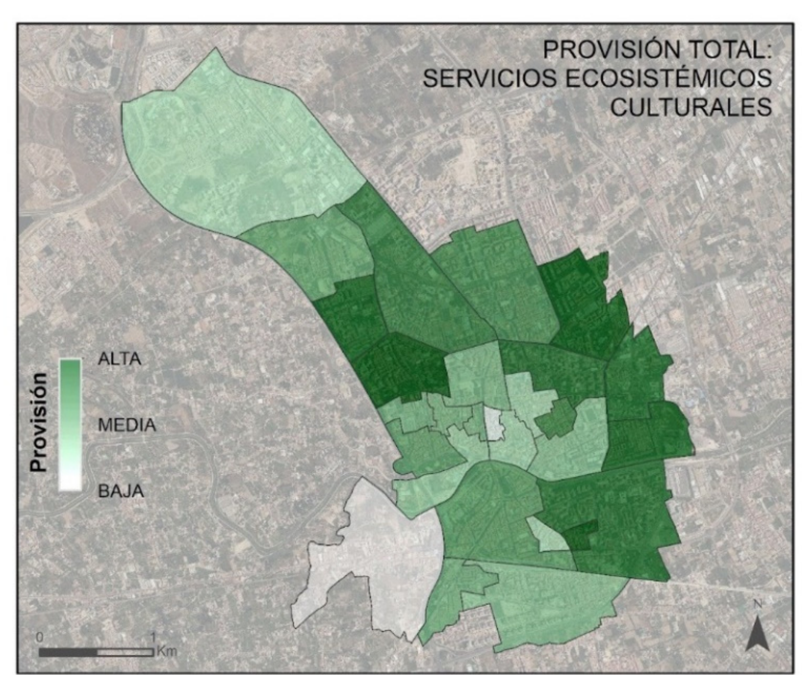


Figura 4. Provisión total de SEC en los barrios de la ciudad de Murcia. Fuente: elaboración propia.

Así, se puede observar cómo los extremos norte (Espinardo) y suroeste (Barriomar) arrojan, especialmente este último, los valores más bajos en todos los servicios y en la provisión total. Pero esto no solo ocurre en áreas más alejadas del corazón de la ciudad, sino que en el propio centro se produce la misma situación, tal y como ocurre en el barrio de San Bartolomé. A excepción de este, se trata de barrios cuya inclusión en la trama urbana principal es compleja. En el caso de Espinardo, su unión administrativa con el resto de la ciudad no se hizo efectiva hasta 1960, y hoy en día siguen existiendo grandes áreas sin continuidad urbana (zonas de huerta, amplios espacios sin edificar, áreas industriales…).

Sin embargo, es especialmente destacable la situación de San Bartolomé y Barriomar, pues su baja provisión de SEC es semejante, aunque el motivo de esta situación es completamente opuesto. En el primero, su localización en el casco antiguo de la ciudad, junto con el derribo de viviendas antiguas y la posterior construcción de edificios en altura en un entramado medieval ha dado lugar a un área muy densa (>27.800 habitantes/km2), sin equipamientos sociales (solo 1 banco) y sin áreas verdes (10 árboles). Mientras que en el segundo, Barriomar, representa un enclave considerado periferia de la ciudad dada la existencia de una importante barrera urbana, la autovía A-30, que separa el barrio del resto de la ciudad. Además, se ha ido desarrollando sin ningún planeamiento a lo largo de la antigua carretera nacional N-340a y junto a las vías del ferrocarril. Estas barreras hacen que, en todos estos barrios, y especialmente en este último, la situación en términos de provisión de SEC sea realmente baja, pues existe una falta patente de arbolado viario en general, sino de espacios verdes e incluso de equipamientos que faciliten la interacción social entre residentes.

En contraposición, se pueden encontrar otros barrios cuyos valores en los indicadores son elevados. Estas áreas residenciales se encuentran relativamente próximas al centro histórico de la ciudad, pero sin formar parte de él. Se caracterizan por ser barrios con un mayor grado de planificación urbanística, con una mejor comunicación vial, arbolado urbano y grandes espacios abiertos que permiten el establecimiento de equipamientos de todo tipo. Entre ellos, los barrios de La Flota, Vistabella o San Antón sobresalen en todos los índices con respecto al resto de áreas. Así, Vistabella, que fue diseñado como “ciudad jardín” en la primera mitad del siglo XX, posee jardines exteriores e interiores, arbolado en gran parte de sus calles y espacios estanciales; San Antón posee una gran masa arbórea viaria, así como en los parques que en él se sitúan, siendo de los más grandes del municipio. Por último, La Flota, cuyo origen es más reciente, con calles más amplias, arboladas, con áreas verdes y espacios estanciales entre bloques de viviendas. De esta forma, estos barrios con un mayor grado de provisión de SEC tienen en común su estructura de ensanche de la ciudad, a partir de mediados del siglo XX, y donde su ubicación en los límites de la ciudad permitía una mayor dotación de espacios públicos.

En definitiva, y a grandes rasgos, es posible afirmar que la situación de los SEC en la ciudad de Murcia no es equitativa. Principalmente, se visualiza una descompensación entre la mitad norte y la mitad sur del casco urbano para casi todos los indicadores, tomando como eje central el río Segura. De esta forma, los barrios situados al norte del río presentan, por lo general, una mayor provisión con respecto a los localizados en el sur. A su vez, esta dicotomía se vuelve a repetir en ambas divisiones: en la mitad septentrional, los valores más altos se encuentran cuanto más al norte, con la excepción del barrio de Espinardo, propiciados por los nuevos desarrollos durante la última burbuja inmobiliaria; y en la mitad meridional, los índices son inferiores conforme se desplaza al sur.

4. DISCUSIÓN

En este estudio se ha analizado la provisión de SEC en el tejido urbano continuo de la ciudad de Murcia. En primer lugar, cabe destacar que la provisión resultante está directamente vinculada con los indicadores empleados para obtenerla y, por tanto, es imprescindible tenerlo en cuenta a la hora de interpretar los resultados. Como ya se ha comentado previamente, los SEC son el grupo menos estudiado dentro de los servicios ecosistémicos, sin tener una metodología científica firmemente establecida y, consecuentemente, sin tener un uso de indicadores estandarizado. Aunque en la mayoría de los estudios de servicios ecosistémicos urbanos se incluye los SEC como una de las variables, éstos, en la mayoría de los casos, se representan por un número muy limitado de indicadores y servicios, siendo la recreación el más empleado. Por otra parte, muchos servicios culturales que se estudian en ámbitos rurales, y de los cuales existen indicadores establecidos, por cuestiones de características espaciales no se han podido emplear en este estudio. Por esta razón, la lista de servicios ecosistémicos que se ha utilizado en este estudio se basa mayoritariamente en las revisiones bibliográficas de carácter teórico, pero sin haber estado traducidas a estudios prácticos en muchos casos. Consecutivamente, dada la escasa disponibilidad de datos espaciales, y la complejidad de cuantificar, medir y representar objetivamente los indicadores de SEC, este estudio, aparte de analizar la provisión de

servicios ecosistémicos urbanos, tiene como objetivo poner de manifiesto la necesidad de estudios relativos a los SEC urbanos, establecimiento de una metodología más estandarizada y su implementación en estrategias de desarrollo urbanístico.

En segundo lugar, la provisión de servicios ecosistémicos, tal y como se ha analizado en este trabajo, y en función de la base teórica de los servicios ecosistémicos, puede ser interpretada directamente utilizando terminología relativa a la calidad de la vida urbana. Es decir, una mayor provisión de SEC implica una mejora en el bienestar humano y, por el contrario, una menor provisión disminuye dicho bienestar. Por tanto, los servicios ecosistémicos son beneficios a la sociedad y su grado de confort está directamente influenciado por los valores de provisión. Si se asume que la población urbana sigue y seguirá aumentando, es indudable la importancia de este tipo de estudios, ya que los resultados revelan una polarización evidente dentro de la ciudad en cuanto a la calidad de vida urbana. Además, se puede observar una relación clara entre la morfología urbana y el bienestar, una cuestión a tener en consideración a la hora de planificar nuevos barrios y estudiar posibilidades de mejorar los existentes.

Finalmente, aparte de las ya comentadas, este estudio puede ser empleado en diferentes aplicaciones. Por ello, en un futuro se intentará relacionar el nivel de provisión de SEC y el bienestar humano con distintas variables socio-geográficas, tales como la renta familiar media, el valor de los inmuebles o diferentes factores de la calidad de vida urbana, con el objetivo de obtener un resultado más exhaustivo.

5. CONCLUSIONES

Se ha hecho un análisis geoespacial de los SEC en la ciudad de Murcia. A partir de 5 indicadores se han obtenido los mapas de provisión de SEC y un mapa de provisión total de servicios culturales. Se puede observar una provisión espacialmente irregular dependiente de diversos factores geográficos. También, el estudio abarca la problemática de representar y cuantificar los indicadores que definen los SEC urbanos, subrayando la importancia de la sistematización de la metodología y el aumento del número de estudios relevantes. Dado que la provisión está estrechamente vinculada con la calidad de vida urbana, se ha deducido que el bienestar humano depende de la morfología urbana y sus características. Por esa razón, se evidencia la necesidad de incluir estudios sobre los SEC en las estrategias de planificación urbana, con el fin de conseguir ciudades más sostenibles y cómodas para sus habitantes.

AGRADECIMIENTOS

La referencia Este estudio ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España mediante las ayudas para contratos predoctorales para la formación de profesorado universitario (FPU) de la que el primer autor es beneficiario (FPU18/03622).

6. BIBLIOGRAFÍA

Badiu, D. L., Iojă, C. I., Pătroescu, M., Breuste, J., Artmann, M., Niță, M. R., ... & Onose, D. A. (2016). Is urban green space per capita a valuable target to achieve cities' sustainability goals? Romania as a case study. *Ecological Indicators*, 70, 53-66. d oi.org/10.1016/j.ecolind.2016.05.044

Bagstad, K. J., Villa, F., Batker, D., Harrison-Cox, J., Voigt, B., & Johnson, G. W. (2014). From theoretical to actual ecosystem services: mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments. *Ecology and Society*, 19(2). doi: 10.5751/ES-06523-190264.

Beyer, K. M., Kaltenbach, A., Szabo, A., Bogar, S., Nieto, F. J., & Malecki, K. M. (2014). Exposure to neighborhood green space and mental health: evidence from the survey of the health of Wisconsin. *International journal of environmental research and public health*, 11(3), 3453-3472. doi.org/10.3390/ijerph110303453

Bjerke, T., Østdahl, T., Thrane, C., & Strumse, E. (2006). Vegetation density of urban parks and perceived appropriateness for recreation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 5(1), 35-44. doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.006

Bolund, P., & Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological economics*, 29(2), 293-301. doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00013-0

Bratman, G. N., Anderson, C. B., Berman, M. G., Cochran, B., De Vries, S., Flanders, J., ... & Daily, G. C. (2019). Nature and mental health: An ecosystem service perspective. *Science advances*, 5(7), eaax0903. DOI: 10.1126/sciadv.aax0903

Cheng, X., Van Damme, S., Li, L., & Uyttenhove, P. (2019). Evaluation of cultural ecosystem services: A review of methods. *Ecosystem services*, 37, 100925. doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100925

Chiesura, A. (2004). The role of urban parks for the sustainable city. Landscape and urban planning, 68(1), 129-138. doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.08.003

Daniel, T. C., Muhar, A., Arnberger, A., Aznar, O., Boyd, J. W., Chan, K. M., ... & von der Dunk, A. (2012). Contributions of cultural services to the ecosystem services agenda. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(23), 8812-8819. doi.org/10.1073/pnas.1114773109

Dijkstra, L., & Poelman, H. (2012). Cities in Europe: the new OECD-EC definition. *Regional focus*, 1(2012), 1-13.

Enssle, F., & Kabisch, N. (2020). Urban green spaces for the social interaction, health and well-being of older people—An integrated view of urban ecosystem services and socio-environmental justice. *Environmental science & policy*, 109, 36-44. doi.org/10.1016/j.envsci.2020.04.008

Fischer, L. K., Honold, J., Botzat, A., Brinkmeyer, D., Cvejić, R., Delshammar, T., ... & Kowarik, I. (2018). Recreational ecosystem services in European cities: Sociocultural and geographical contexts matter for park use. *Ecosystem services*, 31, 455-467. doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.01.015

Gómez-Baggethun, E., Gren, Å., Barton, D. N., Langemeyer, J., McPhearson, T., O'farrell, P., ... & Kremer, P. (2013). Urban ecosystem services. En *Urbanization, biodiversity and ecosystem services: Challenges and opportunities* (pp. 175-251). *Springer*, Dordrecht.

Gozalo, G. R., Morillas, J. M. B., & González, D. M. (2019). Perceptions and use of urban green spaces on the basis of size. Urban Forestry & Urban Greening, 46, 126470. doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126470

Grunewald, K., Richter, B., Meinel, G., Herold, H., & Syrbe, R. U. (2017). Proposal of indicators regarding the provision and accessibility of green spaces for assessing the ecosystem service "recreation in the city" in Germany. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 13(2), 26-39. doi.org/10.1080/21513732.2017.1283361

Hausmann, A., Slotow, R. O. B., Burns, J. K., & Di Minin, E. (2016). The ecosystem service of sense of place: benefits for human well-being and biodiversity conservation. *Environmental conservation*, 43(2), 117-127. doi.org/10.1017/S0376892915000314

Hernández-Morcillo, M., Plieninger, T., & Bieling, C. (2013). An empirical review of cultural ecosystem service indicators. *Ecological indicators*, 29, 434-444. doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.01.013

Kardan, O., Gozdyra, P., Misic, B., Moola, F., Palmer, L. J., Paus, T., & Berman, M. G. (2015). Neighborhood greenspace and health in a large urban center. *Scientific reports*, 5(1), 1-14.

Ko, H., & Son, Y. (2018). Perceptions of cultural ecosystem services in urban green spaces: A case study in Gwacheon, Republic of Korea. *Ecological indicators*, 91, 299-306. doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.006

La Rosa, D., Spyra, M., & Inostroza, L. (2016). Indicators of Cultural Ecosystem Services for urban planning: A review. *Ecological Indicators*, 61, 74-89. doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.04.028

Larondelle, N., & Haase, D. (2013). Urban ecosystem services assessment along a rural–urban gradient: A cross-analysis of European cities. *Ecological Indicators*, 29, 179-190. doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.12.022

Mao, Q., Wang, L., Guo, Q., Li, Y., Liu, M., & Xu, G. (2020). Evaluating cultural ecosystem services of urban residential green spaces from the perspective of residents' satisfaction with green space. *Frontiers in public health*, 226. doi: 10.3389/fpubh.2020.00226

McDonald, R.; Aljabar, L.; Aubuchon, C.; Birnbaum, H.G.; Chandler, C.; Toomey, B.; Daley, J.; Jimenez, W.; Trieschman, E.; Paque, J.; Zeiper, M. (2017). *Funding Trees For Health: An Analysis of Finance and Policy Actions To Enable Tree Planting For Public Health*. The Nature Conservancy: Arlington, VA, USA, 2017.

Milcu, A. I., Hanspach, J., Abson, D., & Fischer, J. (2013). Cultural ecosystem services: a literature review and prospects for future research. *Ecology and society*, 18(3). doi.org/10.5751/ES-05790-180344

Millennium ecosystem assessment, M. E. A. (2005). *Ecosystems and human well-being* (Vol. 5, pp. 563-563). Washington, DC: Island press.

Plieninger, T., Dijks, S., Oteros-Rozas, E., & Bieling, C. (2013). Assessing, mapping, and quantifying cultural ecosystem services at community level. *Land use policy*, 33, 118-129. doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.12.013

Rall, E., Bieling, C., Zytynska, S., & Haase, D. (2017). Exploring city-wide patterns of cultural ecosystem service perceptions and use. *Ecological Indicators*, 77, 80-95. doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.001

Rašković, S., & Decker, R. (2015). The influence of trees on the perception of urban squares. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(2), 237-245. doi.org/10.1016/j.ufug.2015.02.003

Russo, A., & Cirella, G. T. (2018). Modern compact cities: how much greenery do we need?. *International journal of environmental research and public health*, 15(10), 2180. doi.org/10.3390/ijerph15102180

Schipperijn, J., Bentsen, P., Troelsen, J., Toftager, M., & Stigsdotter, U. K. (2013). Associations between physical activity and characteristics of urban green space. *Urban forestry & urban greening*, 12(1), 109-116. doi.org/10.1016/j.ufug.2012.12.002

Soga, M., Evans, M. J., Tsuchiya, K., & Fukano, Y. (2021). A room with a green view: the importance of nearby nature for mental health during the COVID-19 pandemic. *Ecological Applications*, 31(2), e2248. doi.org/10.1002/eap.2248

Sugiyama, T., Leslie, E., Giles-Corti, B., & Owen, N. (2008). Associations of neighbourhood greenness with physical and mental health: do walking, social coherence and local social interaction explain the relationships?. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 62(5), e9-e9. doi.org/10.1136/jech.2007.064287

Ulrich, R. S. (1984). View through a window may influence recovery from surgery. *Science*, 224(4647), 420-421. DOI: 10.1126/science.6143402

Vesely, É. T. (2007). Green for green: The perceived value of a quantitative change in the urban tree estate of New Zealand. *Ecological Economics*, 63(2-3), 605-615. doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.12.019

Williams, D. R., & Stewart, S. I. (1998). Sense of place: An elusive concept that is finding a home in ecosystem management. *Journal of forestry*, 96(5), 18-23. doi.org/10.1093/jof/96.5.18

World Health Organization, WHO, T. (2017). Urban green spaces: a brief for action.

Zhang, Y., Hussain, A., Deng, J., & Letson, N. (2007). Public attitudes toward urban trees and supporting urban tree programs. *Environment and behavior*, 39(6), 797-814. doi.org/10.1177/0013916506292326

Žlender, V., & Gemin, S. (2020). Testing urban dwellers' sense of place towards leisure and recreational peri-urban green open spaces in two European cities. *Cities*, 98, 102579. doi.org/10.1016/j.cities.2019.102579.

Zwierzchowska, I., Hof, A., Iojă, I. C., Mueller, C., Poniży, L., Breuste, J., & Mizgajski, A. (2018). Multi-scale assessment of cultural ecosystem services of parks in Central European cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 30, 84-97. doi.org/10.1016/j.ufug.2017.12.017



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 335-342

Toma de decisiones geoespaciales: complejidad y sostenibilidad de los servicios ecosistémicos forestales

G. Krsnik[1], J.R. González Olabarría[1], K. Reynolds[2], S. Paplanus[3], J. Garcia-Gonzalo[1]

[1] *Centre de Ciència i Tecnología Forestal de Catalunya (CTFC). Ctra Sant Llorenç de Morunys, km 2, 25280 Solsona.*
[2] *US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific NW Station. 3200 SW Jefferson Way, Corvallis OR 97331, EEUU.*
[3] *Mountain View Business Group LLS. 1283 Hibiscus St, Upland, CA 91784, EEUU.*

goran.krsnik@ctfc.ca, jr.gonzalez@ctfc.cat, keith.reynolds@usda.gov, steve@mountain-viewgroup.com, j.garcia@ctfc.cat

RESUMEN: Para una gestión adecuada de un territorio la toma de decisiones es un paso imprescindible, requiriendo un buen y detallado conocimiento de las características de la realidad geoespacial. Tanto su determinación como la aproximación es un proceso complicado cuyo modelado depende directamente de la metodología utilizada. Nosotros consideramos que la cuantificación y la cartografía de las variables que definen la realidad geoespacial son los primeros pasos hacia una gestión sostenible. Para ello utilizamos el sistema EMDS (Ecosystem Modelling Decision Support), un marco metodológico que cumple con la mayoría de los requisitos de un análisis multi-funcional y multi-objetivo orientado a la toma de decisiones espaciales. En este estudio queremos destacar la importancia de una buena base metodológica para la toma de decisiones espaciales aportando tres ejemplos exhaustivos, donde, partiendo de la aproximación de la realidad geoespacial utilizando una gran cantidad de datos georreferenciados, se ha intentado mitigar la complejidad de un análisis multi-objetivo. Los estudios se centran en el análisis de la provisión de servicios ecosistémicos forestales, tanto en espacios rurales como urbanos, utilizando variables estáticas y dinámicas, con el objetivo de definir la idoneidad del uso forestal, determinar la vocación del bosque, facilitar la elección de la gestión adecuada y hacer comparaciones entre diferentes espacios geográficos. Se observa una provisión estrechamente relacionada con las características de la realidad geoespacial de cada área, y por tanto, se observa fácilmente su heterogeneidad, tanto a nivel local, como a nivel regional y nacional.

Palabras-clave: toma de decisiones, servicios ecosistémicos, Ecosystem Modelling Decision Support, análisis geoespacial

1. INTRODUCCIÓN

Explicar la realidad geoespacial significa explicar el espacio en el que vivimos incluyendo todos los contenidos, conexiones, procesos y relaciones que lo determinan. En un mundo constantemente cambiante, representar la realidad espacial es una tarea compleja que conlleva muchos retos, pero es un paso imprescindible para la toma de decisiones geoespaciales – un proceso que, mediante tecnologías digitales y geográficas, con ayuda de datos de carácter espacial, nos ayuda a sacar conclusiones relativas al territorio en cuestión (Crossland et al., 1995). Las herramientas de toma de decisiones espaciales empezaron a desarrollarse hace unas décadas, gracias al avance de ordenadores y tecnologías digitales, pero su mayor avance se observa en los últimos años. Ese avance también viene relacionado con el actual, y cada vez más visible, cambio climático que requiere una gestión sostenible de recursos medioambientales implicando tecnologías geográficas y de toma de decisiones en sus estrategias (Keenan y Jankowski, 2019).

Los servicios ecosistémicos son tan solo una de las variables que explican la realidad geoespacial. Se trata de beneficios que obtenemos los humanos de diferentes tipos de ecosistemas, siendo los bosques uno de ellos (MEA, 2005). Es un enfoque científico reciente que intenta conseguir el balance entre la capacidad de ecosistemas de proveer beneficios y la demanda de éstos por parte de la sociedad, maximizando la provisión y, a la vez, disminuyendo el riesgo medioambiental (García-Nieto et al., 2013). No obstante, debido al carácter de constante cambio, a la hora de tomar decisiones, es imprescindible tener en cuenta no solo la realidad espacial actual, sino la del futuro también. Estudiar la provisión de servicios ecosistémicos reales y la determinación de la vocación del bosque actual resultan ser los primeros pasos en cuanto a una gestión

de servicios sostenible (Daily et al., 2009). No obstante, la necesidad de extrapolar la provisión, mediante simulaciones espaciotemporales, y la definición de la vocación potencial en el futuro, en función de las características del bosque en una realidad cambiante, es primordial si se quiere definir una gestión sostenible a largo plazo (Bennett et al., 2015). Adicionalmente, la posibilidad de poder comparar la provisión de servicios en dos territorios diferentes, con semejantes o diferentes características, mejora el proceso de toma de decisiones aumentando la probabilidad de definir la gestión más idónea para el espacio en cuestión. Para ello se requiere una estandarización de indicadores que representan y definen cada uno de los servicios ecosistémicos habilitando así una comparación más objetiva y válida (Dobbs et al., 2018).

Igual que representar la realidad geoespacial, determinar las características de servicios ecosistémicos forestales, con el fin de tomar una decisión geoespacial, es un proceso complejo (Petz y Oudenhoven, 2012). Por eso, la cartografía y la cuantificación de indicadores y, por tanto, de servicios ecosistémicos, es el primer paso hacia un análisis exhaustivo que posibilita una toma de decisiones objetiva (Ericksen et al., 2012; Schägner et al., 2013). Para ello, en este estudio utilizamos el sistema EMDS (Ecosystem Modelling Decision Support), una herramienta geoespacial que posibilita la toma de decisiones medioambientales, aproximando la realidad geoespacial, sus contenidos y relaciones, a través de modelos, cuantificando la provisión de servicios ecosistémicos mediante reglas de lógica difusa y eligiendo reglas de toma de decisiones propuestas por el usuario utilizando diferentes análisis de jerarquías e inter-correlaciones espaciales (Reynolds et al, 2015). Además de haber sido mejorado para este estudio, el sistema EMDS ha cumplido todos los requisitos necesarios para ejecutar un análisis geoespacial multiobjetivo de alta complejidad.

Finalmente, en este estudio se ha empleado el sistema EMDS en tres análisis diferentes de diferente resolución espacial, cuyos objetivos y metodologías se describen a continuación. En los tres casos, se ha representado la realidad espacial relativa a la provisión de servicios ecosistémicos a partir de una lista de indicadores que lo definen. El objetivo de este trabajo es analizar el uso de herramientas innovadoras de toma de decisiones espaciales con el fin de definir la gestión de servicios ecosistémicos más idónea y comparar la provisión de éstos en dos realidades espaciales diferentes.

2. METODOLOGÍA

Este estudio consta de tres análisis diferentes con objetivos particulares diferentes, pero utilizando el mismo marco metodológico. Tanto el área de estudio como los datos utilizados varían en función del análisis empleado. La lista de los estudios junto con los objetivos de cada uno se enumera en la Tabla 1. El objetivo general del estudio es emplear herramientas innovadoras de toma de decisiones espaciales en diferentes ámbitos científicos, vinculados a los análisis de gestión de zonas forestales, tanto rurales como urbanas, y analizar las posibilidades, ventajas y desventajas que nos proveen dichas tecnologías espaciales. Los análisis se centran en la provisión de servicios ecosistémicos forestales en diferentes ámbitos geográficos, con el fin de definir la gestión forestal más idónea en función de las características de provisión actual o en un futuro. Con ese fin, se estudia la vocación del bosque, actual y futura, refiriéndose a la alternativa de aprovechamiento forestal más apropiada dadas sus características naturales y capacidad de proveer servicios. También se estudian diferentes posibilidades de hacer comparaciones espaciales válidas del mismo fenómeno en realidades geoespaciales distintas.

En los tres análisis empleados se parte de la colección de datos espaciales. Dada la complejidad de representación de la realidad geoespacial, el objetivo es utilizar una gran cantidad de datos para definir los indicadores que describan la realidad relativa a la provisión de servicios ecosistémicos. También, en función de la disponibilidad y la naturaleza de datos, igual que las características espaciales de cada uno de los análisis, los indicadores se agregan espacialmente antes de empezar el proceso de análisis de datos. El flujo de trabajo de los tres análisis se muestra en la Figura 1.

En el proceso del análisis de datos se utiliza el sistema EMDS. Es una herramienta para diseñar e implementar la toma de decisiones espaciales desarrollada en el US Forest Service y mejorada en función de las necesidades de este estudio, para poder ser aplicada y utilizada en análisis de alta complejidad (Reynolds and Hessburg, 2014). Ya que su funcionamiento se basa en conocimiento, el usuario es el que define todas las reglas de representación de la realidad geoespacial. El sistema es capaz de analizar una gran cantidad de datos espaciales, muchas veces abstractos, normalizarlos, ejecutar evaluaciones, construir análisis de jerarquías y ayudar significativamente en la toma de decisiones. Por esa razón, dado el alto cumplimiento de los requisitos necesarios para poder llevar a cabo un análisis de servicios ecosistémicos exhaustivo, se ha decidido emplear esta herramienta y evaluar las ventajas y desventajas a la hora de realizar este tipo de estudios.

Tabla 1. Lista de análisis incluidos en el estudio

	Objetivo del análisis	*Área de estudio*	*Número de indicadores utilizados*	*Número de servicios ecosistémicos (SSEE) y vocaciones definidos*	*Unidad espacial de referencia*
1	Cartografiar la provisión de servicios ecosistémicos e identificar la vocación del bosque actual a partir de la provisión	Comunidad autónoma de Cataluña	32	12 SSEE 5 vocaciones	Mapa forestal español 1:50 000
2	Cartografiar la vocación del bosque primaria futura en función de indicadores de servicios ecosistémicos simulados espacio-temporalmente	Bosques de Pinus Sylvestris de España	13	5 vocaciones	Parcelas de Inventario Forestal Nacional
3	Cartografiar la provisión de servicios ecosistémicos de las zonas verdes urbanas y hacer comparaciones entre dos territorios	Municipio de Barcelona (España) y sector norte de Santiago (Chile)	10 para cada ciudad	10 SSEE para cada ciudad	Distritos censales urbanos

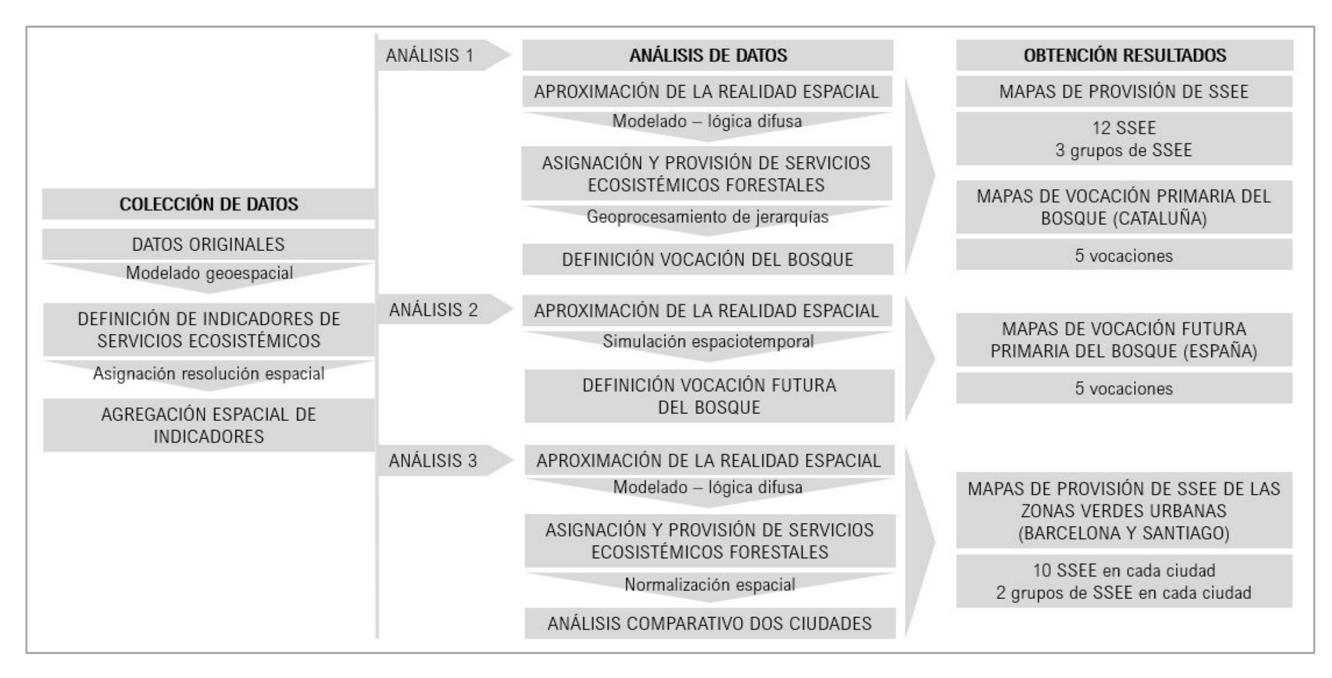


Figura 1. Flujo de trabajo.

En primer lugar, se aproxima la realidad geoespacial mediante modelos llamados “red de redes”. Son modelos lógicos donde la evaluación de cada red depende de otras redes dentro del mismo árbol jerárquico. Cada red que se sitúa en el fondo de cada árbol de redes, denominada la red primaria o red sin descendientes, corresponde a los indicadores modelados que representan los servicios ecosistémicos y se interpreta mediante reglas de lógica difusa, donde los valores observados se comparan con las funciones de membrecía difusa. En otras palabras, cada uno de los valores observados se convierte en un valor denominado “fuerza de evidencia” y se propagan hacia arriba dentro del modelo lógico. De esta manera, cada red que forma parte del árbol jerárquico es afectada por los valores de la “fuerza de evidencia” de sus descendientes. El rango de valores de esa unidad se establece entre -1 y 1, donde el -1 indica que no hay evidencia y el 1 que la evidencia es máxima. En este estudio en concreto, el valor -1 indica que los valores observados son tan bajos que el indicador en cuestión no es capaz de proveer el servicio ecosistémico estudiado. Por otro lado, si el valor es

1, dicho indicador provee completamente el servicio en cuestión. Los umbrales de asignación del valor -1 y 1 se definen particularmente para cada indicador tras el análisis de histograma de cada uno, mientras que los valores entre el -1 y 1 se establecen automáticamente mediante reglas de lógica difusa en función de los umbrales de corte establecidos (Reynolds y Hessburg, 2014).

Una vez asignados los valores de la "fuerza de evidencia" a todas las redes, se analizan las correlaciones entre los indicadores, se asignan los pesos y se cuantifica la provisión de servicios ecosistémicos.

A continuación, con el fin de obtener las vocaciones del bosque, se realiza un análisis estratégico de jerarquías en el cual se establece la relación y el grado de relación entre cada uno de los servicios ecosistémicos obtenidos en el modelado espacial con cada una de las alternativas de vocación posible. Al final del proceso se ordenan las alternativas jerárquicamente en función de la puntuación obtenida tras valorar la correlación entre la provisión de servicios ecosistémicos y la vocación posible. La vocación con la máxima puntuación se define como la vocación primaria.

La base metodológica para la definición de servicios ecosistémicos es el Millenium Ecosystem Assessment (MEA, 2005), un marco internacional para la gestión de ecosistemas. Las categorías empleadas en enumeran en la Tabla 2.

Tabla 2. Lista de servicios ecosistémicos utilizados en el estudio (Anexo I)

	Análisis 1	*Análisis 2*	*Análisis 3*
Servicios ecosistémicos	De provisión (agua, madera, comida), de regulación (agua, clima, suelo, biodiversidad), culturales (valor estético, valor cultural, turismo, recreación, bosques periurbanos)	No aplicable	De regulación (regulación de temperatura, mejora de la calidad de aire, drenaje, regulación de la biodiversidad, regulación de ruido), culturales (recreación, valor social, valor psicológico, valor cultural, valor estético)
Vocaciones	Protectora, productiva, para la conservación, social, multifuncional	Protectora, productiva, para la conservación, social, multifuncional	No aplicable

3. RESULTADOS

Dada la gran cantidad de resultados obtenidos, se mostrará solo la selección más representativa de mapas relativos a la provisión de servicios ecosistémicos rurales y urbanos.

En la Figura 2 se representa una parte de los resultados relativos al análisis 1. Los resultados se muestran con la resolución espacial del Mapa Forestal Español 1:50 000 englobando el conjunto de mapas de evidencia obtenidos a partir de 32 indicadores de servicios ecosistémicos utilizados en el análisis. La distribución de provisión es irregular, con ciertos patrones espaciales en cada uno de los mapas. Las zonas del Pirineo ilerdense y gironés registran el estado de evidencia de provisión muy alto o alto, igual que las zonas boscosas de las comarcas La Selva y Baix Empordà. Esos valores se deben a la alta productividad forestal y biomasa, el potencial de obtención de productos no madereros relativamente grande y la buena accesibilidad por carretera. Por otro lado, las zonas que registran poca cantidad de precipitaciones anuales, y por tanto limitan la producción de productos madereros, el crecimiento o acumulación del agua, registran valores muy bajos de evidencia, y corresponden con las zonas planas de la provincia de Lleida.

Los servicios de regulación tienen valores de evidencia altos en casi todo el Pirineo catalán, en la depresión prelitoral de la provincia de Barcelona y en la zona central de la provincia de Girona. Se trata de zonas con densa cobertura forestal, bosques con capacidades de almacenamiento de CO_2 o bosques localizados en pendientes considerables, entre otras. Por el contrario, los bosques del sur de Cataluña y de la plana de Lleida carecen de dichas características, y es por ello que registran unos valores bajos de evidencia.

Los servicios culturales tienen altos niveles de provisión en las zonas costeras, en la proximidad de las grandes ciudades o corresponden a bosques específicos del interior de Cataluña. En todos casos, se trata de bosques con dominante uso recreativo, social, bosques periurbanos o áreas con el índice de belleza paisajística elevado.

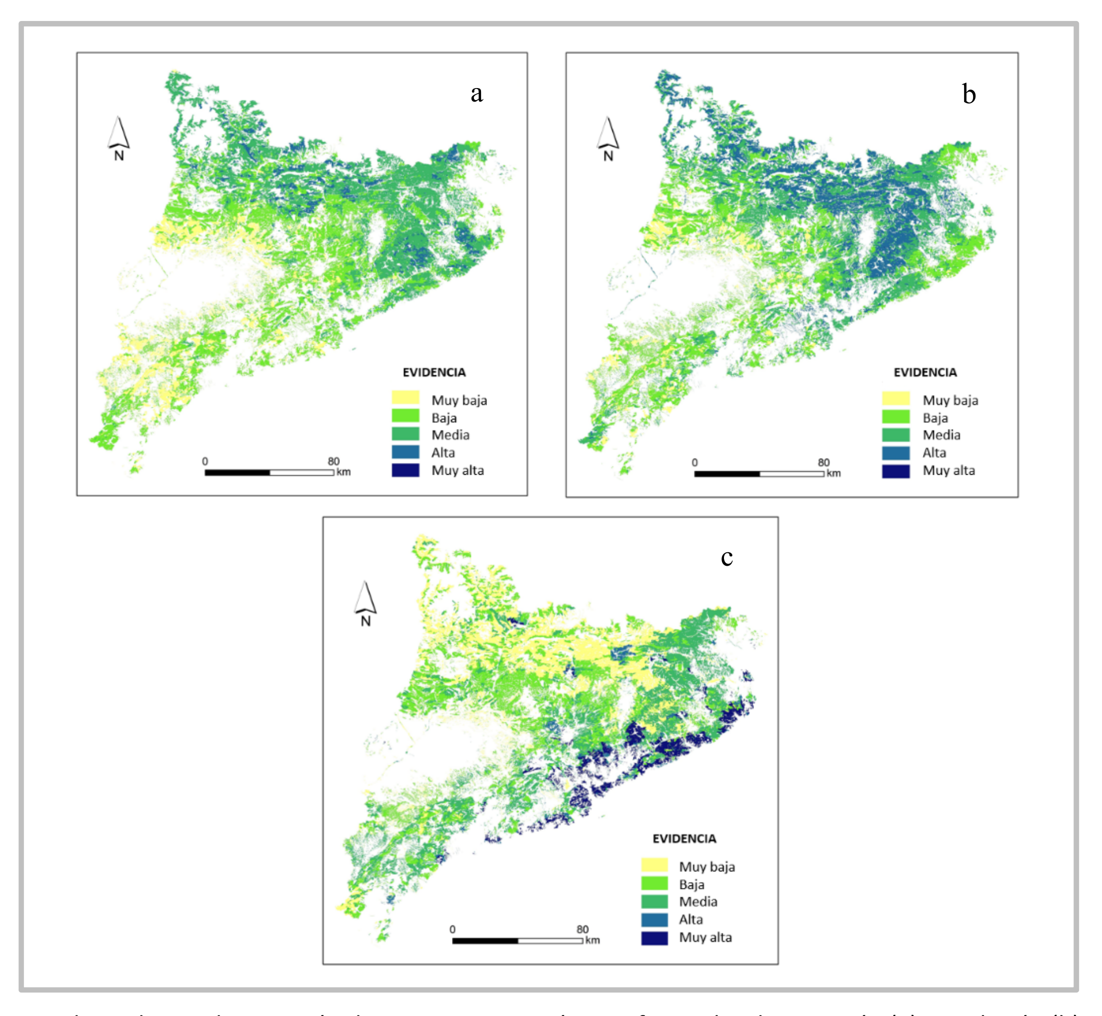


Figura 2. Mapas de evidencia de provisión de servicios ecosistémicos forestales de provisión (a), regulación (b) y culturales (c) en Cataluña.

En la Figura 3 se puede observar la evidencia de provisión de servicios ecosistémicos de regulación, proveídos las zonas verdes urbanas, en las ciudades de Barcelona y Santiago; una parte del resultado correspondiente al análisis 3. Los datos se representan a nivel de distrito censal en ambos casos.

Se observa polarización espacial en la provisión de servicios de regulación en las dos ciudades, en el caso de Barcelona en el noroeste se registran valores de evidencia más elevados, igual que en ciertos barrios en el sur de la ciudad. En Santiago se observa la diferencia generalizada entre el este y oeste. Dado que se trata de servicios de regulación, zonas de alta evidencia se corresponden a áreas de cubierta vegetal continua, zonas impermeables y áreas con buena conectividad entre las zonas verdes. En cuanto a la comparación entre las ciudades, se observan diferentes características de la infraestructura verde que causan una buena provisión de servicios. Mientras en Barcelona la mayoría de las zonas con valores de evidencia altos corresponde a parques y bosques periurbanos públicos, en Santiago la evidencia es más elevada en barrios de edificación mayoritariamente baja, compuestos por casas familiares y sus jardines adyacentes. Por tanto, son las zonas de uso privado las que mejoran significativamente la provisión de servicios de regulación en Santiago.

Finalmente, con carácter general, la provisión total de servicios de regulación en Barcelona es más elevada que en Santiago, dado el mejor estado de las zonas verdes urbanas y debido a una densidad de árboles viarios mucho más alta que posibilita la conectividad entre las zonas verdes de gran tamaño y mejora la regulación de la temperatura, calidad de aire y ruido dentro de la zona urbana.

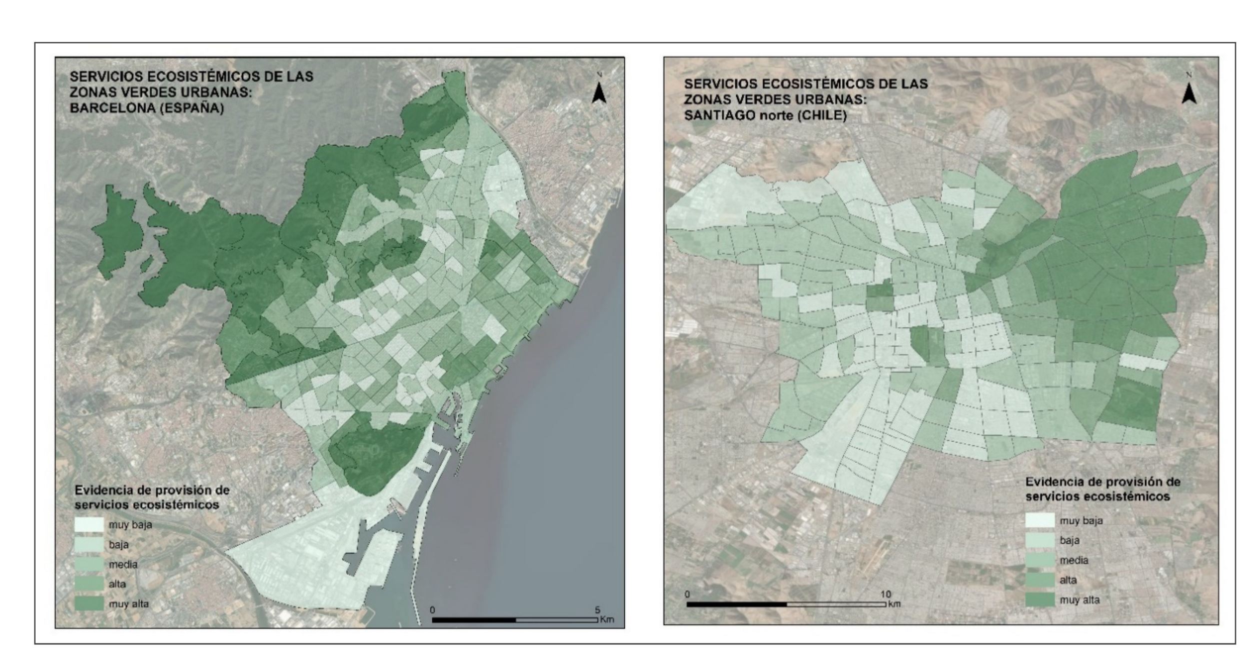


Figura 3. Mapas de evidencia de provisión de servicios ecosistémicos de regulación en Barcelona y Santiago .

4. DISCUSIÓN

Tal y como se ha explicado anteriormente, representar la realidad espacial de forma exhaustiva y objetiva es una tarea difícil. En este estudio se ha intentado llevar a cabo unos análisis que pudieran representar de forma veraz los procesos geográficos relativos a la provisión de servicios ecosistémicos forestales, sin dar prioridad a ningún grupo de servicios, e intentando incluir una gran cantidad de indicadores, puesto que es común que los estudios prioricen un grupo de servicios en función de la trayectoria científica del grupo de investigación o intereses particulares, representando así una realidad errónea. No obstante, con el fin de definir la gestión idónea, es imprescindible valorar con la misma importancia el conjunto de todos los indicadores de servicios. Una de las ventajas del sistema EDMS es su versatilidad. En otras palabras, dado que su funcionamiento se basa en el conocimiento del usuario, la representación de la realidad espacial también depende del mismo y, por lo tanto, a la hora de construir el modelo, se detecta con facilidad posible interés vinculado a la representación. Por eso, es importante conocer el modelo, las relaciones establecidas entre los indicadores y el grado de su inter-correlación a la hora de interpretar los resultados, porque éstos pueden variar significativamente dependiendo de las características del modelo que representa la realidad espacial.

Por otro lado, la elección de variables que representan la provisión de servicios ecosistémicos es un paso de gran importancia. No obstante, la disponibilidad de datos es un factor limitante que dificulta en mayor medida una aproximación objetiva. Cabe destacar que este proceso es de especial relevancia en estudios de comparación, como es el caso en el análisis 3 de este estudio, donde se comparan dos espacios diferentes. La disponibilidad de datos depende mayoritariamente de instituciones de ámbito local o regional y la falta de estandarización de datos espaciales causa dificultades a la hora de elegir indicadores relevantes para representar la provisión de servicios forestales. Eso muchas veces dificulta una representación exhaustiva, por lo cual, a la hora de interpretar los resultados es imprescindible tener en cuenta los indicadores que se utilizan en ese proceso, independientemente de su cantidad. No obstante, es cierto que, al utilizar una mayor cantidad de variables, se reduce la dependencia relativa, y el espacio se aproxima con más veracidad. Por esa misma razón, en este estudio, en los tres análisis, se ha intentado utilizar la máxima cantidad de indicadores posible, lo cual se ha podido realizar de forma exitosa en el análisis regional, pero ha causado problemas en el estudio de comparación a nivel local.

Adicionalmente, aparte de las limitaciones causadas por la disponibilidad de datos espaciales, cabe destacar que algunas variables aplicadas se han utilizado de forma muy limitada en estudios de temáticas semejantes. Se trata, mayoritariamente, de indicadores que representan los servicios culturales, especialmente los referentes a ámbitos urbanos. Pues, dadas sus características abstractas e intangibles, la mayoría de los indicadores son difíciles de cuantificar y, por lo tanto, su aplicabilidad es polémica. Por otro lado, la falta de estudios relevantes, debido a un mayor número de estudios con un enfoque natural o forestal y

menos interés en lo cultural, ha causado la necesidad de una mejor estandarización de los indicadores culturales aplicando diferentes metodologías de su cuantificación. En este estudio, como ya se ha comentado previamente, se ha intentado encontrar un balance entre los indicadores de carácter natural y social, intentando no dar la prioridad a ninguno de ellos, utilizando un mayor número de indicadores culturales de lo que se suele hacer en estudios de este tipo, con el fin de evitar una aproximación errónea de la realidad.

Finalmente, a pesar de la gran dependencia de datos, su tratamiento y representación, el sistema EMDS facilita considerablemente la aproximación de la realidad espacial, cuantificación de variables y construcción de modelos geográficos. Siempre y cuando se tengan en cuenta las dificultades de representar digitalmente algo tan complejo como es la realidad geoespacial, se puede deducir que se trata de una herramienta con un gran potencial de ser aplicada en la toma de decisiones espaciales.

5. CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio de aplicabilidad de tecnologías innovadoras en la toma de decisiones geoespaciales. Se han hecho tres estudios, con diferentes datos y áreas de estudio, a nivel local, regional y nacional, analizando la provisión de servicios ecosistémicos forestales, con el fin de elegir la gestión más idónea en función de las características forestales. Se concluye que el proceso de la toma de decisiones es un paso imprescindible para una gestión sostenible de recursos medioambientales y que la incorporación de tecnologías digitales innovadoras facilita considerablemente dicho proceso. El sistema EDMS, a pesar de ciertas desventajas y gran dependencia de una correcta elección de indicadores a utilizar, posibilita de forma directa, basada en el conocimiento del usuario, una válida aproximación de la realidad espacial superando así la complejidad de los análisis geoespaciales.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha realizado financiado por la AGAUR (Generalitat de Catalunya), ayuda de doctorado referencia 2020FI_B2 00147. Con la misma ayuda se realizó una estancia en la University of Eastern Finland. Por otro lado, se llevaron a cabo dos estancias financiadas por el proyecto Suforun (proyecto RISE Marie Curie), cuyos resultados también se encuentran en este estudio. Se trata de colaboraciones con US Forest Service - Pacific NW Station y la Universidad Pontificia Católica de Chile.

6. BIBLIOGRAFÍA

Bennett, E. M., Cramer, W., Begossi, A., Cundill, G., Díaz, S., Egoh, B. N., ... y Woodward, G. (2015). Linking biodiversity, ecosystem services, and human well-being: three challenges for designing research for sustainability. *Current opinion in environmental sustainability*, 14, 76-85. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.03.007

Crossland, M. D., Wynne, B. E. y Perkins, W. C. (1995). Spatial decision support systems: An overview of technology and a test of efficacy. *Decision support systems*, 14(3), 219-235. https://doi.org/10.1016/0167-9236(94)00018-N

Daily, G. C., Polasky, S., Goldstein, J., Kareiva, P. M., Mooney, H. A., Pejchar, L., ... y Shallenberger, R. (2009). Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1), 21-28. https://doi.org/10.1890/080025

Dobbs, C., Hernández-Moreno, Á., Reyes-Paecke, S. y Miranda, M. D. (2018). Exploring temporal dynamics of urban ecosystem services in Latin America: The case of Bogota (Colombia) and Santiago (Chile). *Ecological Indicators*, 85, 1068-1080. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.062

Ericksen, P., de Leeuw, J., Said, M., Silvestri, S. y Zaibet, L. (2012). Mapping ecosystem services in the Ewaso Ng'iro catchment. International Journal of Biodiversity Science, *Ecosystem Services & Management*, 8(1-2), 122-134. https://doi.org/10.1080/21513732.2011.651487

García-Nieto, A. P., García-Llorente, M., Iniesta-Arandia, I. y Martín-López, B. (2013). Mapping forest ecosystem services: from providing units to beneficiaries. *Ecosystem Services*, 4, 126-138. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.03.003

Keenan, P. B. y Jankowski, P. (2019). Spatial decision support systems: Three decades on. *Decision Support Systems*, 116, 64-76. https://doi.org/10.1016/j.dss.2018.10.010

Petz, K. y van Oudenhoven, A. P. (2012). Modelling land management effect on ecosystem functions and services: a study in the Netherlands. International Journal of Biodiversity Science, *Ecosystem Services & Management*, 8(1-2), 135-155. https://doi.org/10.1080/21513732.2011.642409

Reid, W. V. (2005). Millennium ecosystem assessment.

Reynolds, K. M. y Hessburg, P. F. (2014). *An overview of the ecosystem management decision-support system. Making transparent environmental management decisions*, 3-22.

Reynolds, K., Paplanus, S., Miller, B. y Murphy, P. (2014). Design features behind success of the ecosystem management decision support system and future development. *Forests*, 6(1), 27-46. https://doi.org/10.3390/f6010027

Schägner, J. P., Brander, L., Maes, J. y Hartje, V. (2013). Mapping ecosystem services' values: Current practice and future prospects. *Ecosystem services*, 4, 33-46. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.02.003

ANEXO I: FUENTES DE INFORMACIÓN DE LOS INDICADORES DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

ForestalCatalana: http://forestalcatalana.gencat.cat/es
ICGC (2005): Cartographic and Geological Institut of and Catalonia, "Map of Biophysical Variables of Catalonia." Ministry of Agriculture, Livestock, Fisheries and Food and Ministry of Territory and Sustainibility, Generalitat of Catalonia, Barcelona, Spain, 2016.
MITECO (2000): https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/productividad_potencial.aspx
MAPA (2005): M. Legal, "ESCORRENTÍA TOTAL ANUAL Página 1 de 6," pp. 2–7, 2005.
MITECO (2016): https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/mfe50.aspx
Bonet et al. (2014): J. A. Bonet, J. R. González-olabarria, and J. M. D. E. Aragón, "Mushroom Production as an Alternative for Rural Development in a Forested Mountainous Area," vol. 11, pp. 535–543, 2014, doi: 0.1007/s11629-013-2877-0.
Blasco et al. (2009): E. Blasco, J. R. González-Olabarria, P. Rodriguéz-Veiga, T. Pukkala, O. Kolehmainen, and M. Palahí, "Predicting scenic beauty of forest stands in Catalonia (North-east Spain)," *Journal of Forestry Research*, vol. 20, no. 1, pp. 73–78, 2009, doi: 10.1007/s11676-009-0013-3.
MAPA (2012): https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/inventario-cartografia/inventario-nacional-erosion-suelos/default.aspx
MAPA (2008): https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/desertificacion-restauracion-forestal/lucha-contra-la-desertificacion/lch_espana.aspx
DTS (2020): https://sig.gencat.cat/visors/hipermapa.html
FEEC (2020): https://senders.feec.cat/
Idescat (2020):https://www.idescat.cat/?lang=es
ACdPC (2020): https://sig.gencat.cat/portalsigcultura.html



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 343-352

Empleo de técnicas de teledetección en el análisis de los efectos de la DANA de 2019 en el entorno del Mar Menor (Región de Murcia)

G. Miguel Martínez[1], E. Colmenero-Hidalgo[1], E. García-Meléndez[1], M. Ferrer-Julià[1], I. Pereira[1], J.A. Cruz[2,1]

[1] Grupo de Investigación Geología Ambiental, Cuaternario y Geodiversidad (Q-GEO), Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León. Campus de Vegazana, s/n. 24071 León.
[2] Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. Avda. José Antonio Novais, s/n , 28040 Madrid.

gmigum00@estudiantes.unileon.es, e.colmenero@unileon.es, egarm@unileon.es, mferj@unileon.es, iperer02@estudiantes.unileon.es, jcrum@unileon.es

RESUMEN: En este trabajo se presenta un análisis de los efectos de las depresiones aisladas en niveles altos (DANA) en el Mar Menor mediante teledetección. Las DANA generan tormentas con lluvias torrenciales y marejadas ciclónicas que suben el nivel del mar e inundan y erosionan la costa. Las predicciones del International Panel on Climate Change (IPCC) indican que estos eventos extremos serán cada vez más frecuentes. El objetivo de este trabajo es evaluar el uso de la teledetección para el análisis de los efectos de las inundaciones derivadas de las DANA, sobre todo los efectos de las inundaciones de las zonas costeras causadas por las marejadas ciclónicas asociadas. Para ello, se analizaron tres imágenes del sensor Sentinel-2 tomadas antes, durante y después de la DANA de septiembre de 2019. De cada una de ellas se realizaron tres clasificaciones con distintos algoritmos: SAM (Spectral Angle Mapper), Mahalanobis distance y Maximum likelihood. Como resultado se obtuvieron tres mapas de usos de suelo para cada una de las imágenes. Esta nueva cartografía se validó mediante una matriz de confusión, con un ajuste superior al 77,8% en las imágenes clasificadas con el algoritmo Mahalanobis distance. Su análisis reveló que la delimitación de las áreas afectadas por las riadas e inundaciones continentales es la más fácil de realizar al ser las más extensas, y que también pueden detectarse los efectos de la marejada ciclónica en la barra arenosa de La Manga, aunque con más dificultad. Aun así, este método permite identificar la disminución de la anchura de las playas por la combinación del aumento del nivel del mar y la erosión del oleaje durante el paso de la DANA.

Palabras clave: DANA, Mar Menor, teledetección, inundaciones.

1. INTRODUCCIÓN

La teledetección es la adquisición de información sobre un objeto o un fenómeno sin que haya contacto físico con este. La información (imágenes o datos) se obtiene a través de sensores a bordo de aviones o satélites o mediante cámaras adaptadas para la captación de imágenes espectrales en afloramientos en campo y en muestras de mano. Para conseguirlo, esta técnica se basa en la interacción que se produce entre la energía electromagnética y los materiales de la superficie terrestre (Sabins, 1997), que genera una señal cuya intensidad depende de la naturaleza y propiedades del material. Las absorciones que se producen en longitudes de onda concretas del espectro electromagnético son características de cada material, y su detección en la señal recibida permite la identificación de este (Gupta, 1991).

Desde hace unos años, la teledetección se ha convertido en una herramienta esencial, junto con otras, para el estudio, planificación y gestión de los riesgos naturales (Joyce et al., 2009). Las imágenes de satélite tomadas en el contexto de la ocurrencia de un desastre natural permiten ayudar a tomar decisiones sobre la gestión del riesgo y pueden ser una guía durante la ocurrencia de ciertos desastres para la planificación de situaciones de emergencia; además, son útiles para realizar la cuantificación de daños con posterioridad (Domeneghetti et al., 2019 y sus referencias). De todos los peligros naturales, las inundaciones fluviales y costeras son las que más afectan a la sociedad, perjudicando a varios millones de personas cada año (EM-DAT, 2022). La población total y el valor económico de los activos materiales ubicados en zonas propensas a inundaciones ha aumentado enormemente en las últimas décadas, y se espera que los riesgos asociados sigan

incrementándose debido al crecimiento de la población, la subida del nivel del mar y el aumento de la frecuencia de los eventos de inundación debido al cambio climático (Jongman et al., 2012; IPCC, 2021). En el litoral mediterráneo español, el riesgo de inundación fluvial y costero está muy ligado a los eventos de lluvias torrenciales (Olcina Cantos, 2017), causados normalmente por la formación de depresiones aisladas en niveles altos (DANA).

Las DANA se definen como depresiones aisladas en niveles altos originadas por el aislamiento de un ramal del chorro polar o subtropical, que poseen un movimiento completamente independiente del flujo que lo generó. La corriente en chorro circula generalmente de oeste a este siguiendo una trayectoria rectilínea, pero cuando su flujo se intensifica, puede ondularse y tomar una componente norte-sur muy marcada, llegando a estrangularse y aislarse parte de esta ondulación, originando una DANA (León, 2003), muy frecuentes en el Levante español.

Las DANA son fenómenos meteorológicos extremos que provocan lluvias de gran intensidad en cortos espacios de tiempo, causando frecuentes inundaciones fluviales. Además, pueden generar "marejadas ciclónicas" o *storm surge*, que consisten en el aumento anormal del nivel del mar durante el evento, rebasando el pronóstico astronómico de la subida natural por la marea. Esta subida anormal del nivel del mar se produce cuando el centro de bajas presiones atmosféricas se sitúa sobre el mar, permitiendo la expansión vertical de la columna de agua y causando una subida relativa del nivel del mar en la zona, que puede oscilar entre varios centímetros a varios metros. Cuando la borrasca toca tierra, esta columna de agua expandida invade el continente, empujada además por las fuertes rachas de viento asociadas a la perturbación. Además, el oleaje es mucho mayor a causa del viento, amplificando aún más los efectos sobre la franja costera. Las marejadas ciclónicas durante las DANA son las causantes de las inundaciones costeras y de los daños asociados en las infraestructuras y ecosistemas costeros (National Hurricane Center, 2022).

En este contexto, el objetivo del presente estudio es evaluar el uso de la teledetección en el análisis de los efectos de las inundaciones derivadas de las DANA, prestando especial atención a las consecuencias de las marejadas ciclónicas asociadas, que son menos conocidas. Para ello, se ha elegido como caso de estudio la DANA que afectó al entorno del Mar Menor (Murcia) entre el 10 y el 14 de septiembre de 2019, durante la cual se registraron picos de precipitación de cerca de 300 mm, subidas del nivel del mar cercanos a 50 cm, alturas máximas de oleaje superiores a los 4 m y pérdidas económicas por valor de más de 500 millones de euros (Romero Díaz y Pérez Morales, 2021; AEMET, 2019; Puertos del Estado, 2022).

2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Mar Menor es una laguna litoral situada al este de la comarca conocida como Campo de Cartagena, en la provincia de Murcia (España) (Figura 1). Esta laguna de forma triangular se extiende desde San Pedro del Pinatar hasta el Cabo de Palos, y está separada del mar Mediterráneo por una larga y estrecha franja de tierra emergida, formada por depósitos arenosos, conocida como La Manga. La conexión de la laguna con el Mediterráneo se produce a través de tres canales ("golas") que atraviesan La Manga. La franja arenosa de La Manga se formó durante el Cuaternario debido al depósito de los sedimentos transportados por las corrientes de deriva litoral, siendo el crecimiento de esta flecha litoral la causa del cierre de la antigua bahía costera y su transformación en la laguna actual.

La red de drenaje del área de estudio se caracteriza por la inexistencia de corrientes continuas de aguas superficiales. El sistema se basa en una serie de ramblas y barrancos aislados entre sí que recogen las aguas en los periodos de lluvias y las vierten al Mar Menor, aunque en ocasiones la baja pendiente, las actividades agrícolas y la construcción han difuminado su trazado en las zonas más cercanas a su desembocadura (Conesa García, 1990).

El clima del Mar Menor y de toda su zona próxima es de tipo Mediterráneo semiárido (Conesa García, 1990). Las temperaturas medias anuales oscilan entre 16 y 18°C en toda la llanura central, y entre 14 y 16°C en la Sierra Minera de Cartagena, al sur. Las temperaturas medias máximas alcanzan valores extremos de entre 38 y 42°C en todo el sector nororiental de la cuenca y en la zona sur del Mar Menor (Belmonte Serrato y Romero Díaz, 2011). Las precipitaciones en esta zona son escasas e intermitentes, muchas veces de tipo torrencial (Conesa García, 1990), llegando a registrarse en pocas horas la mitad de las precipitaciones de todo el año, produciendo frecuentes desbordamientos de la red fluvial. Estos eventos de lluvias torrenciales, que se producen principalmente a finales del verano y en otoño, suelen estar asociados a las DANA.

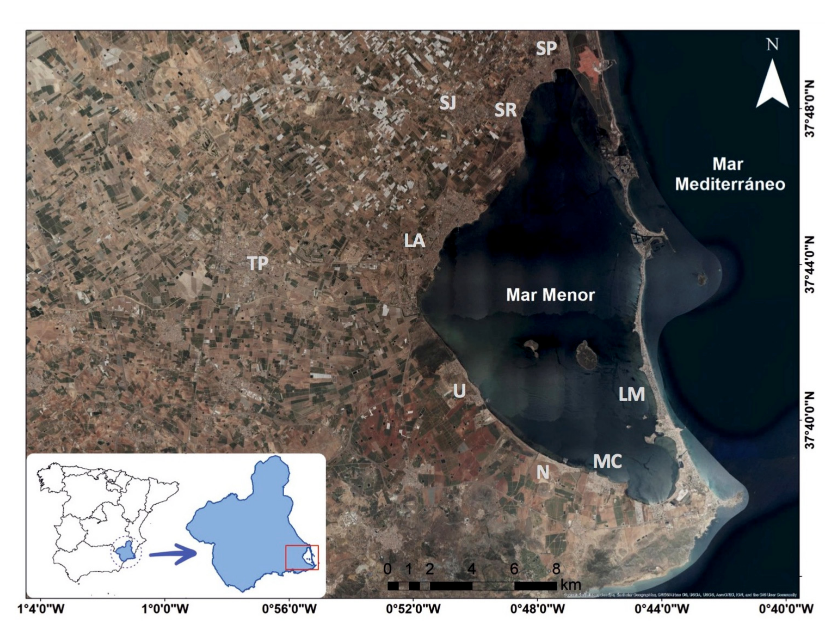


Figura 1. Vista de satélite del Mar Menor y de su entorno, y localización en la Región de Murcia. Los núcleos de población principales están señalados con sus iniciales (LA: Los Alcázares; SR: Santiago de la Ribera; SJ: San Javier; SP: San Pedro del Pinatar; LM: La Manga; U: Los Urrutia; N: Los Nietos; MC: Mar de Cristal; TP: Torre-Pacheco).

Las orillas de la laguna están fuertemente urbanizadas, destacando las poblaciones de San Pedro del Pinatar, San Javier y su base aérea, Los Alcázares y las numerosas urbanizaciones en la orilla sur y en La Manga desarrolladas a partir de los años 70 (Figura 1). Este desarrollo urbanístico ha dado como resultado un fuerte incremento de la superficie de suelo sellado, que Pérez-Morales et al. (2021) han estimado en más de 128 km^2 (de un total de 800 km^2) hasta el año 2011. Por otro lado, el Campo de Cartagena es una zona eminentemente agrícola, con cultivos de frutos secos, leguminosas y cereales, así como cultivos intensivos de hortalizas (Belmonte Serrato y Romero Díaz, 2011).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para caracterizar las áreas afectadas por la DANA dentro de la zona de estudio es necesario conocer los usos del suelo de los terrenos susceptibles de ser inundados por los efectos de esta perturbación atmosférica. Para ello, se confeccionaron mapas de usos del suelo específicos, enfocados sobre todo a caracterizar láminas de agua de distintas características y limitando la caracterización de clases terrestres a usos muy generales. Para generar estos mapas, se trataron imágenes multiespectrales mediante diferentes métodos de clasificación. Además, se realizó un análisis visual mediante el visor *Google Earth Pro* para explorar el terreno, determinar el uso del suelo en diferentes puntos de la zona de estudio y, finalmente, validar el resultado de las clasificaciones. Finalmente, se trabajó con la base de datos del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE) para cuantificar el tipo de usos terrestres afectados por la lámina de agua, al tratarse de una cartografía más detallada de estos usos que la obtenida en la clasificación. Las distintas fases del proceso se detallan a continuación (Figura 2).

3.1. Elección de las imágenes multiespectrales y operaciones de pre-tratamiento

Para realizar este trabajo se eligieron imágenes multiespectrales de la misión Copernicus Sentinel-2, de la Agencia Espacial Europea (ESA). Los Sentinel-2 A y B son una pareja de satélites gemelos que se encuentran en órbita polar desfasados 180° uno de otro, lo que permite obtener datos de la misma zona cada 5 días. Las imágenes descargadas fueron las de los pasos del 19 de agosto, 13 de septiembre y 3 de octubre de 2019, que se corresponden con la situación previa, durante y posterior a la DANA, respectivamente. Cabe destacar que, a pesar de que el sensor Sentinel-2 es un sensor óptico y, por lo tanto, no puede atravesar la cubierta de nubes, durante la mañana del 13 de septiembre el estado del cielo permitió la obtención de una imagen. En todas las imágenes se trabajaron las bandas espectrales 2, 3, 4, 6 y 8, correspondientes al rango del espectro electromagnético del visible e infrarrojo cercano (VNIR - *visible and near infrared*).

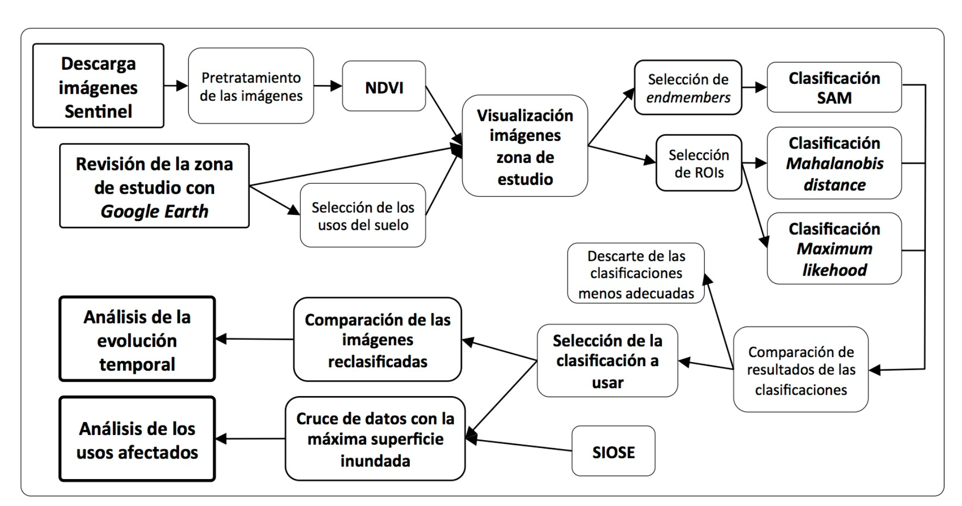


Figura 2. Diagrama de flujo del procedimiento realizado en la obtención y procesamiento de las imágenes.

Las imágenes Sentinel-2 se obtuvieron con un nivel de procesado 2A, por lo que ya se presentan corregidas atmosféricamente (valores de reflectancia en BOA - *Bottom Of Atmosphere*) y ortorrectificadas. No obstante, se optimizó la ortorectificación aplicando el modelo de elevación digital (MDE) de 5 m del Centro Nacional de Información Geográfica sobre la ortorectificación original (MDE de 90 m) mediante el programa SNAP. Posteriormente se realizó un remuestreo mediante el método "superresolución de imágenes de multirresolución" del procesador Sen2Res para dejar todas las bandas espectrales analizadas con la misma resolución espacial de 10 m conservando los valores de reflectancia.

3.2. Cálculo del NDVI (*Normalized difference vegetation index*)

El NDVI es un índice de vegetación muy utilizado que refleja la vigorosidad de la vegetación, permitiendo distinguir las zonas con vegetación del resto, así como diferenciar distintos tipos de vegetación. Para calcular el índice se aplicó la siguiente fórmula:

$$NDVI = (\mathrm{NIR} - \mathrm{R})/(\mathrm{NIR} + \mathrm{R}) \quad (1)$$

donde R es la banda correspondiente a las longitudes del rojo y NIR a las del infrarrojo cercano.

3.3. Operaciones de clasificación de las imágenes

Una vez terminados los tratamientos de preparación y el NDVI descritos anteriormente, se realizaron varias clasificaciones supervisadas de las imágenes mediante la aplicación de diferentes algoritmos. Las clases identificadas se presentan en la Tabla 1.

3.3.1. Clasificación SAM (Spectral Angle Mapper)

Para realizar una clasificación SAM, en primer lugar se determinaron los *endmembers*, que son las curvas espectrales correspondientes a componentes puros (aquí, distintos usos del suelo), a partir de las cuales se identifican las clases que se quieren obtener (Plaza et al., 2004). En este estudio, al carecer de espectrotecas de referencia, los *endmembers* se obtuvieron a partir de la selección de píxeles de la imagen que se consideraron representativos de una única clase (píxeles puros). Debido a que un mismo uso del suelo puede tener distintas características y, por tanto, distinta respuesta espectral, fue necesario definir distintos *endmembers* para un mismo uso del suelo, por lo que posteriormente se obtuvieron distintas clases para un mismo uso del suelo (Tabla 1). La identificación de la naturaleza de los *endmembers* se realizó mediante el análisis visual con *Google Earth* y los valores NDVI.

Una vez definidos los *endmembers*, el algoritmo SAM compara el ángulo entre un espectro de referencia y el espectro obtenido en cada uno de los píxeles no identificados en la imagen, determinando la similitud de un espectro de prueba "t" con un espectro de referencia "r", aplicando la siguiente ecuación (Kruse et al., 1993):

$$\alpha = cos^{-1}\left(\frac{t \cdot r}{\|t\| \cdot \|r\|}\right) \quad (2)$$

Tabla 1. Clases generadas según el uso del suelo. (*) generada durante el análisis.

Clases	*Características principales*
Zona herbácea-roquedo	Suelo desnudo, con presencia de pequeñas herbáceas
Cultivo vigoroso	Cultivos en desarrollo, normalmente leguminosas o frutales
Matorral	Zonas de matorral desarrollado
Campos cosechados	Campos de cultivo ya cosechados o en barbecho en los que se ve el suelo desnudo
Invernadero	Cultivos dentro de invernaderos
Arena de playa	Zonas costeras con desarrollo de playa arenosa
Mar Mediterráneo	Masas de agua del Mediterráneo
Mar Menor	Masa de agua del Mar Menor, poco profunda
Balsas de regadíos	Masas de agua de almacén presentes en el Campo de Cartagena
Salinas profundas	Salinas que, debido a su profundidad, presentan desarrollo de algas verdes
Salinas poco profundas	Salinas que no presentan algas verdes debido a su escasa profundidad
Salinas abandonadas	Salinas no mantenidas, que permanecen secas la mayor parte del tiempo
Área urbana	Poblaciones, urbanizaciones, zonas hoteleras
Carreteras	Red viaria
Agua con sedimentos*	Agua transportada a través de las ramblas al Mar Menor durante la DANA

3.3.2. *Clasificaciones basadas en el uso de ROIs* (*Regions Of Interest*)

Estas clasificaciones supervisadas utilizan como herramienta las áreas ROIs (*Regions Of Interest*), que son un muestreo de píxeles que se corresponden con una zona de la imagen en la cual solamente existe un uso de suelo determinado. Las ROIs definidas (Clases en la Tabla 1) son utilizadas posteriormente como base de datos para realizar las diferentes clasificaciones. Dentro de este grupo de clasificaciones supervisadas, se aplicaron las basadas en los algoritmos de clasificación *Mahalanobis distance* y *Maximum likehood*. El algoritmo *Mahalanobis distance* utiliza la técnica estadística de la matriz de covarianza para asignar los píxeles de la imagen a cada clase predefinida con los ROIs, mientras que el *Maximum likehood* es un método estadístico para reconocer patrones mediante el cual se asigna una clase a los píxeles de la imagen según la probabilidad de que pertenezcan a dicha clase predefinida en los ROIs (Abburu y Babu Golla, 2015).

3.3.3. *Elección de la clasificación más adecuada*

Tras la aplicación de los tres algoritmos mencionados, se realizó una comparación entre sus resultados para seleccionar el más adecuado para el estudio. Para ello, se efectuó una matriz de confusión contrastando con nuevas áreas de validación extraídas a partir del análisis visual en *Google Earth*. Los mejores resultados fueron los obtenidos mediante el algoritmo *Mahalanobis distance*, con una precisión general de la clasificación de entre el 94% (imagen previa a la DANA) al 77,78% (imagen tomada durante la DANA). El método SAM fue descartado debido a la gran cantidad de *endmembers* necesarios para alcanzar resultados similares en la clasificación de la imagen, mientras que el algoritmo *Maximum likehood* se rechazó ya que realizaba asignaciones erróneas de píxeles a determinadas clases, entre ellas algunas de especial interés para el estudio.

3.4. Análisis cuantitativo de los efectos de las inundaciones

La cuantificación de la extensión de usos de suelo afectados por las inundaciones se llevó a cabo cruzando los datos del SIOSE para la zona de estudio con la extensión de la máxima superficie inundada calculada a partir de la imagen tomada durante la DANA. Para facilitar el análisis de los resultados se agruparon los usos del suelo del SIOSE en 12 categorías.

4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

El análisis con el algoritmo *Mahalanobis distance* de la imagen previa a la DANA, tomada en agosto de 2019 (Figura 3), permite identificar los principales usos de suelo de la zona de estudio.

La agricultura ocupa la mayor parte de la superficie del Campo de Cartagena, destacando -por las fechas- los campos cosechados, además del predominio del paisaje de herbáceas y roquedo en las laderas de la Sierra Minera de Cartagena, al sur del Mar Menor. Respecto a la costa, está ocupada por zonas fuertemente urbanizadas, ya sean poblaciones consolidadas o urbanizaciones de segundas residencias, contribuyendo enormemente al sellado del suelo ante las precipitaciones (por ejemplo, más del 40% de la superficie del municipio de Los Alcázares estaba sellado en 2011 (Pérez-Morales et al., 2021)). Merece la pena destacar la intensa urbanización de la franja correspondiente a La Manga, donde apenas hay restos de elementos naturales (matorrales o herbáceas asociadas a dunas), que han quedado restringidas a pequeñas áreas marginales como desembocaduras y canales de ramblas. En el extremo septentrional del Mar Menor (Figura 3B) destaca el contraste existente entre la extensión de terreno sin urbanizar correspondiente al Parque Regional de las Salinas y Arenales de San Pedro del Pinatar, en el que se pueden apreciar zonas que conservan la transición geobotánica natural (arena de playa-herbáceas en dunas-matorrales), y el extenso núcleo urbano formado por las poblaciones de San Pedro del Pinatar, Santiago de La Ribera y San Javier, en donde además una base aérea militar ocupa la orilla del Mar Menor.

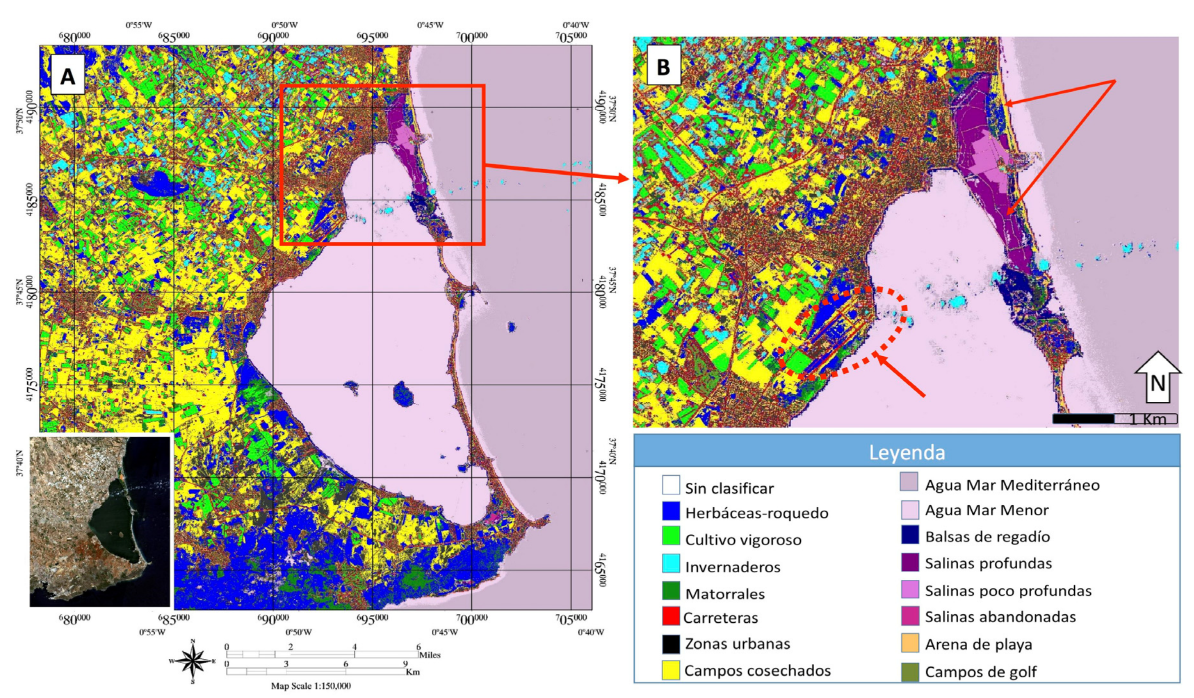


Figura 3. A) Clasificación de la imagen del 19 de agosto de 2019 (representada en color real en la imagen más pequeña). El recuadro rojo indica el área ampliada en B. B) Detalle del norte del Mar Menor: las flechas rojas marcan la localización del Parque Regional de las Salinas y Arenales de San Pedro del Pinatar, mientras que la Base Aérea de San Javier es señalada por un óvalo rojo discontinuo; las manchas azul turquesa sobre el mar son nubes.

La clasificación de la imagen obtenida el 13 de septiembre de 2019 durante el desarrollo de la DANA (Figura 4) permite observar claramente los efectos de las inundaciones en el Campo de Cartagena y en el litoral del Mar Menor. Para captarlo mejor, en esta clasificación se añadió una nueva categoría ("agua con sedimentos", Tabla 1), cuya distribución cubre gran parte del área de estudio, especialmente en la localidad de Los Alcázares y en el propio Mar Menor. La cuantificación realizada tras el cruce de datos con el SIOSE indica que la superficie total inundada fue de más de 130 km^2, afectando a diferentes usos (Tabla 2). Se observa que el área de Los Alcázares quedó prácticamente anegada (Figura 4B), especialmente en las zonas más cercanas al trazado de las ramblas, situadas dentro de zonas calificadas como inundables con un periodo de retorno de 50 años (García Martín et al., 2020). La influencia de las riadas es patente en el Mar Menor, donde se distinguen las plumas de agua dulce cargadas de material en suspensión procedentes del transporte a través de las ramblas que drenan el Campo de Cartagena, y su movimiento hacia el S dentro del Mar Menor siguiendo las corrientes. Esta turbidez de la columna de agua del Mar Menor causada por la presencia de material suspendido y otros componentes arrastrados desde tierra por las riadas generó que, aproximadamente un mes después de la DANA, se produjera un episodio de hipoxia que causó una mortandad masiva de peces y otros organismos marinos (CEDEX, 2020).

La zona de La Manga (Figura 5) no se vio afectada por las inundaciones fluviales, pero sufrió el temporal marítimo en la orilla mediterránea, y sus efectos quedan reflejados en la variación de la respuesta espectral de los diferentes materiales. Se identifica la presencia de fuerte oleaje (que alcanzó cotas inusuales en la zona de hasta 3,95 m (Puertos del Estado, 2022), y que la clasificación confunde con invernaderos seguramente por la gran cantidad de agua batida por el oleaje (Figura 5C).

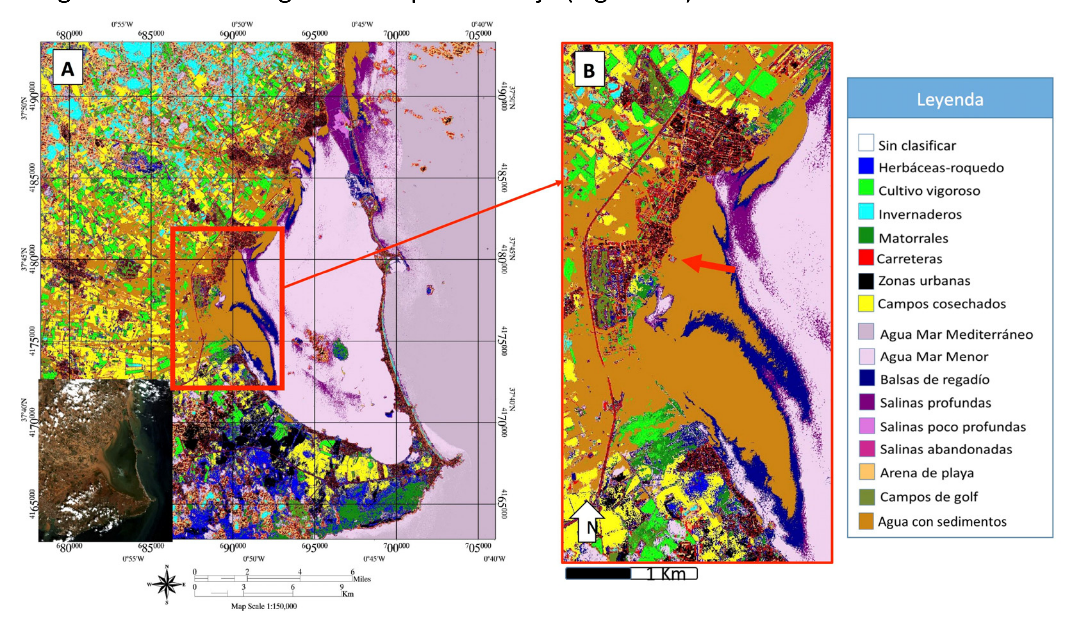


Figura 4. A) Clasificación correspondiente a la imagen obtenida el 13 de septiembre de 2019 (representada en color real en la imagen más pequeña). El recuadro rojo indica el área ampliada en B. B) Zona de Los Alcázares, la flecha roja indica la posición del puerto deportivo, que quedó aislado del resto del núcleo urbano.

Tabla 2. Superficies afectadas por la lámina de agua por inundación, agrupados por categorías de usos de suelo.

Clases	*Superficie del área de estudio (km²)*	*Superficie inundada (km²)*	*Suma nº parcelas SIOSE*	*Porcentaje sobre el total de superficie inundada*
Agricultura	293,53	51,78	11070	38,88
Áreas naturales	136,50	68,23	5804	51,23
Comercio	0,70	0,10	143	0,08
Energía	0,23	0,04	60	0,03
Industria	11,83	4,67	327	3,51
Infraestructuras	38,68	4,54	3756	3,41
Recreativo	9,31	0,87	759	0,65
Residencial	6,11	0,55	4664	0,42
Servicios	2,00	0,23	634	0,18
Servicios básicos	6,43	1,96	176	1,47
Turismo	0,25	0,03	62	0,03
Desconocido	0,80	0,14	988	0,11
Total	***506,37***	***133,2***	***28443***	***100***

Además, en las franjas de playa se observan grandes variaciones respecto a la imagen previa a la DANA (Figuras 3 y 6C), posiblemente debido a la diferente respuesta espectral de la arena al mojarse y al depósito excepcional de sedimentos removidos por el oleaje hacia el interior del litoral. Por ejemplo, en las playas de San Pedro del Pinatar (norte del Mar Menor), la clasificación identifica como zonas asfaltadas (clase "carreteras") áreas de playa con arena mojada. Además, esta zona recibe un gran aporte de sedimentos procedente del norte debido al transporte por la deriva litoral, mientras que en la costa sur de La Manga el aporte de sedimentos -al menos, los más gruesos- no se recibe por el efecto pantalla del puerto de San Pedro del Pinatar, que ejerce de obstáculo a la deriva (Figuras 5A y B). En la zona sur de La Manga (Figura 5C) se puede observar la disminución de la anchura de la playa, posiblemente debido a la acción combinada del fuerte oleaje y de la marejada ciclónica experimentada, que en la boya más cercana a la zona de estudio (Gandía, a más de 150 km) fue registrada como una subida de 22,7 cm sobre el nivel del mar habitual (Puertos del Estado, 2022). La escasa subida por sí sola hace muy difícil aislar el efecto de la marejada ciclónica mediante

esta metodología de estudio, sobre todo teniendo en cuenta el tamaño de resolución de píxel (10 m).

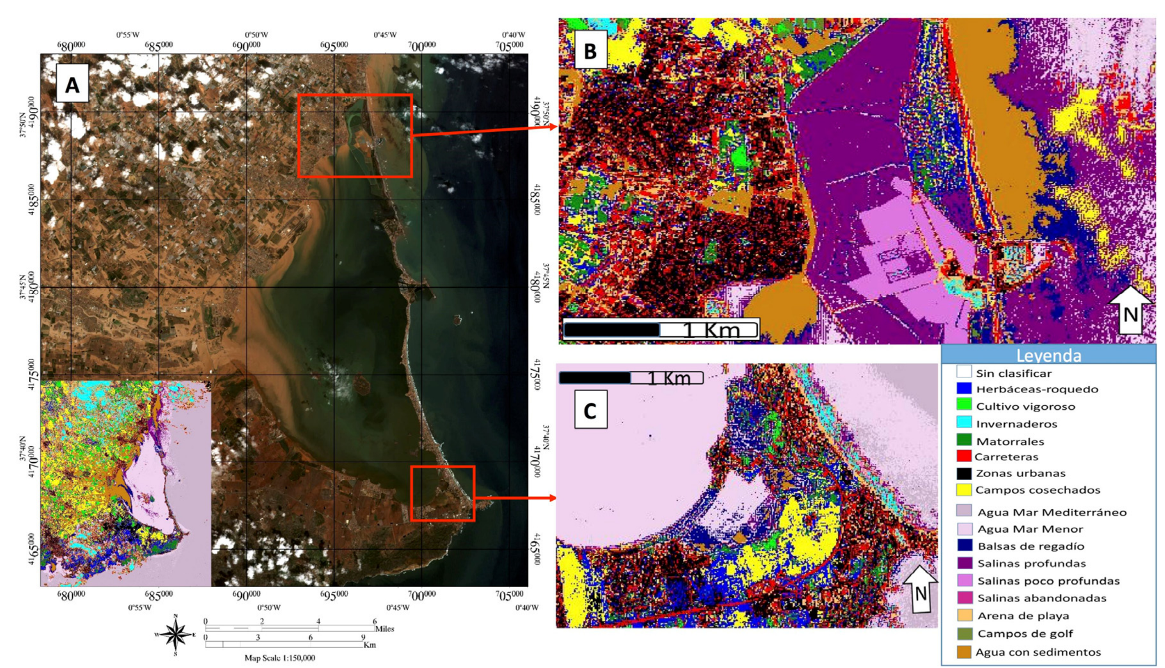


Figura 5. A) Imagen en color RGB obtenida el 13 de septiembre de 2019 en la que se aprecia el material en suspensión (en pequeño, la clasificación obtenida (figura 4A)). Los recuadros rojos indican las áreas ampliadas en las imágenes B y C. B) Área de San Pedro del Pinatar, donde se observa la diferente afectación entre las salinas y el núcleo urbano. C) Comienzo de La Manga, donde destaca la señal en franjas en el frente de playa, con colores que indican fuerte oleaje.

No obstante, la subida del nivel del mar durante estos eventos ha de ser tenida en cuenta de cara a la planificación del litoral, puesto que, durante el 12 de septiembre, día de máxima virulencia de la DANA, la subida del nivel del mar registrada en la boya de Gandía por efecto de la marejada ciclónica fue de 34 cm, incremento mínimo al que hay que añadir el oleaje excepcional de 4 m. Esta situación se repitió durante el temporal Gloria de enero de 2020, cuando la subida del nivel del mar registrada en esta boya fue de 80 cm (Puertos del Estado, 2022).

Por último, es interesante destacar que la gran extensión de salinas perteneciente al Parque Regional al N del Mar Menor no se vio demasiado afectada (Figura 6B), pero sí la pequeña salina abandonada al S de La Manga en la zona de Playa Honda, que fue inundada por aguas del Mar Menor, tal y como se observa en la clasificación (Figuras 5C y 6A). El análisis cuantitativo (Tabla 2) muestra que los usos de suelo más afectados por las inundaciones fueron las áreas naturales (más del 50% del total inundado) y las parcelas agrícolas (un 38%). En el caso de las primeras, conviene destacar su posible papel como zonas de acomodo (*buffer zones*) en la planificación territorial para prevenir los efectos de la subida del nivel del mar y de futuros temporales.

Las consecuencias de la DANA se pueden observar aún varias semanas después de su paso (Figura 6). En el Campo de Cartagena, las parcelas de secano que fueron anegadas experimentan crecimiento de vegetación (clasificadas como herbáceas-roquedo). En lo relativo a las costas, no se observa ensanchamiento de la parte emergida de las playas de la zona meridional del Mar Menor del lado mediterráneo a pesar de las importantes plumas de material en suspensión generadas durante el evento, posiblemente a causa del efecto pantalla del puerto de San Pedro del Pinatar (Figura 5B). Sin embargo, sí se aprecia una mayor anchura de las playas interiores de La Manga, indicando que parte del material atravesó el Mar Menor y se depositó en esta orilla. Por el contrario, las playas aguas abajo de San Pedro del Pinatar experimentaron una fuerte erosión en comparación con la situación anterior a la DANA (Figura 6B-C). En cuanto a las salinas, la antigua salina abandonada situada al comienzo de La Manga en la zona de Playa Honda, inundada durante la DANA (Figura

5), presenta una señal espectral similar a la de las salinas más septentrionales, que permanecen activas, indicando que aún permanecía inundada varias semanas después (Figura 6A).

Figura 6. A) Clasificación de la imagen obtenida el 3 de octubre de 2019, 3 semanas después de la DANA. Los recuadros rojos indican las zonas ampliadas a la derecha. B-C) Ampliación de la zona de San Pedro del Pinatar tras la DANA (B) y su comparación con antes de la DANA (C). D) Detalle del estado de la parte central de La Manga tras la DANA.

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

La cartografía de usos de suelo y el estudio de su evolución temporal mediante técnicas de teledetección adecuadas permiten realizar evaluaciones sobre riesgos que pueden ayudar a la mitigación y gestión de sus efectos sobre las personas y los bienes. La metodología elegida refleja fielmente los efectos de las inundaciones por desbordamiento de cauces fluviales sucedidas durante la DANA de 2019 debido a su gran extensión, y también refleja -aunque en menor medida- las afectaciones en las zonas costeras por el temporal marítimo, que pueden notarse como una disminución de la anchura de algunas playas debido a la combinación del aumento del nivel del mar por marejada ciclónica y el efecto del oleaje.

Sin embargo, la metodología aplicada no permite reflejar el efecto individualizado de la subida transitoria del nivel del mar que se produjo durante la DANA de septiembre de 2019, ya que es muy difícil apreciar un nivel de inundación y retroceso de playa correspondiente a una subida del nivel del mar de unos pocos centímetros, sobre todo cuando aparece combinado con el efecto del oleaje. Aunque las playas hubieran perdido algunas decenas de metros de ancho, tanto el efecto mucho mayor del oleaje como el cambio de respuesta espectral de la arena de las playas hace que no se pueda cuantificar su efecto. No obstante, conviene resaltar que las proyecciones climáticas (IPCC, 2021) indican que el aumento de la temperatura del Mediterráneo provocará que eventos como las DANA sean más frecuentes y posiblemente más energéticos en las próximas décadas, incrementándose la subida del nivel del mar por marejada ciclónica asociada a estos procesos, reforzada además por el oleaje y el aumento progresivo del nivel del mar en la zona. Por lo tanto, el papel de estas metodologías de análisis del cambio en los usos del suelo es vital para realizar proyecciones que mejoren la gestión y ordenación de los espacios costeros para el futuro.

AGRADECIMIENTOS

Investigación financiada por FEDER/ Ministerio de Ciencia e Innovación –Agencia Estatal de Investigación/Proyecto ISGEOMIN-ESP2017-89045-R y por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR con el proyecto HYPOPROCKS-PDC2021-121352-100.

6. BIBLIOGRAFÍA

Abburu, S. y Babu Golla, S. (2015). Satellite Image Classification Methods and Techniques: A Review. *International Journal of Computer Applications*, 119(8), 20-25. https://doi.org/10.5120/21088-3779

AEMET (2019). *Un temporal de lluvia sin precedentes en los últimos 100 años en la Vega Baja del Segura*. http://www.aemet.es/es/noticias/2019/09/temporal_sin_precedentes_en_la_vega_baja_del_segura

Belmonte Serrato, F. y Romero Diaz, A. (2011). El Campo de Cartagena una visión global. En J. Hernández Bastida (Coord.), *Recorridos por el Campo de Cartagena* (pp. 17-48). Instituto Mediterráneo del Agua.

CEDEX (2020). *Plan para la protección del borde litoral del Mar Menor (E.S.T. 2017-2020/59)*. https://www.miteco.gob.es/es/costas/participacion-publica/22-417-5-001_plan-borde-litoral-mar-menor_informe_tcm30-510090.pdf

Conesa García, C. (1990). *El Campo de Cartagena: Clima e Hidrología de un medio semiárido*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Murcia y Ayto. de Cartagena.

Domeneghetti A, Schumann G.J.-P. y Tarpanelli A. (2019). Preface: Remote Sensing for Flood Mapping and Monitoring of Flood Dynamics. *Remote Sensing,* 11(8), 943. https://doi.org/10.3390/rs11080943

EM-DAT (2022). *EM-DAT, The International Disaster Database*. https://www.emdat.be/

García Martin, F.M., Ochoa Rego, J., Medina Vidal, M.D. Rosique Moya, V., Carrillo Sánchez, J.M., Pérez Morales, A., Peñalver Martínez, M.J. y Olmos Noguera, J.M. (2020). *EACS.* https://eacs.carm.es/acciones/analisis-del-comportamiento-de-los-espacios-libres-urbanos-frente-a-episodios-de-inundacion-implementacion-de-suds/

Gupta, R.P. (1991). *Remote Sensing Geology*. Springer-Verlag.

IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. IPCC Sixth Assessement Report*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Jongman, B., Ward, P.J. y Aerts, J.C.J.H. (2012). Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes. *Global Environmental Change*, 22, 823-835. http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.07.004

Joyce, K., Belliss, S.E., Samsonov, S.V., McNeill, S.J. y Glassey, P.J. (2009). A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. *Progress in Physical Geography*, 33(2), 183-207. https://doi.org/10.1177/0309133309339563

Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.W., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J. y Goetz, A.F.H. (1993). The Spectral Image-Processing System (Sips) - Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment,* 44 (2-3), 145-163.

León, F.M. (2003). *Las Gotas Frías/DANAs. Ideas y Conceptos Básicos.* Nota técnica 38 del Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción, Instituto Nacional de Meteorología, pp. 1-14. ISBN: 84-8320-247-6

National Hurricane Center (2022). *Storm surge overview*. https://www.nhc.noaa.gov/surge/

Olcina Cantos, J. (2017). Incremento de episodios de inundación por lluvias de intensidad horaria en el sector central del litoral mediterráneo español: análisis de tendencias en Alicante. *SÉMATA, Ciencias Sociais e Humanidades*, 29, 143-163.

Plaza, A., Martínez, P., Plaza, J., Pérez, R.M., Aguilar, P.L. y Cantero, M.C. (2004). Algoritmos de extracción de endmembers en imágenes hiperespectrales, *Revista de teledetección*, 21, 101-105.

Pérez-Morales, A., Romero-Díaz, A. e Illán-Fernández, E. (2021). Rainfall, anthropogenic soil sealing, and floods. An example from southeastern Spain. En J. Rodríguez-Comino (Ed.), *Precipitation: Earth surface responses and processes* (pp. 499-520). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822699-5.00022-7

Puertos del Estado (2022). Predicción de oleaje, nivel del mar - Boyas y mareógrafos. http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx

Romero Díaz, A. y Pérez Morales, A. (2021). Before, during and after the Dana of September 2019 in the region of Murcia (Spain), as reported in the written press. *Cuadernos de Investigación Geográfica,* 47 (1), 163-182. http://doi.org/10.18172/cig.4769

Sabins, F.F. (1997) *Remote sensing: Principles and interpretation*. (3ª ed.) W.H. Freeman & Company.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 353-361

Análisis de la estructura de la vegetación en pinares afectados por el fuego mediante datos LiDAR e información de campo

A.L. Montealegre Gracia[1,2], F. Pérez Cabello[2], Y.A. Quinga Vela[3], R. Montorio Llovería[2]

[1] *Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, Ctra. de Huesca s/n, 50.090 Zaragoza.*
[2] *Grupo GEOFOREST-IUCA, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50.009 Zaragoza.*
[3] *IUCA, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50.009 Zaragoza.*

monteale@unizar.es, fcabello@unizar.es, 847545@unizar.es, montorio@unizar.es

RESUMEN: El objetivo del trabajo es analizar el grado de recuperación en comunidades de *Pinus halepensis, Pinus nigra y Pinus sylvestris*, comparando zonas quemadas y no afectadas por el fuego. Se han utilizado 33 áreas test distribuidas en diecisiete grandes incendios (>100 ha) que tuvieron lugar entre 1978 y 2008 en Aragón (España). Cada una de las áreas test se compone de un sector quemado, localizado dentro del perímetro del incendio, y de un sector no quemado o control. Por un lado, el diagnóstico de la vegetación en campo se ha llevado a cabo mediante un inventario florístico y fisionómico de los estratos que conforman cada comunidad de pinar. Por otro lado, se han utilizado los datos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de la primera cobertura para calcular las métricas de densidad y cerramiento vegetal de cada área test. El test Wilcoxon Rank-Sum se ha empleado para analizar la magnitud de las diferencias estructurales observadas en campo y en las métricas LiDAR entre sectores quemados y no quemados. Asimismo, con el fin representar cartográficamente la estructura de las formaciones vegetales quemadas, se ha utilizado la información de recubrimiento por estrato para generar composiciones de color Rojo-Verde-Azul. Los resultados muestran que las comunidades vegetales que surgen tras el fuego presentan menor recubrimiento medio por estrato, quedando muy poco desarrollados los estratos superiores frente a los estratos inferiores.

Palabras-clave: incendio forestal, estructura forestal, PNOA, resiliencia

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales en los ecosistemas mediterráneos se han convertido en uno de los problemas ambientales de mayor trascendencia, como consecuencia de su alta recurrencia y magnitud en términos de superficie afectada (Jiménez-Ruano et al., 2016). Algunas especies vegetales cuentan con diversas estrategias eco-fisiológicas para recuperarse, tales como el rebrote, los bancos de semillas persistentes y la capacidad de dispersión. Sin embargo, la alteración del régimen de incendios ha hecho mucho más vulnerables a estos ecosistemas, dificultándose, en ocasiones, su recuperación natural y requiriendo una gestión forestal específica (Viana-Soto et al., 2022).

La resiliencia al fuego constituye un importante indicador sobre el tiempo que necesita el sistema para alcanzar los valores previos a la perturbación. La teledetección óptica ofrece una poderosa alternativa a los métodos de campo para monitorizar la recuperación forestal basada en la respuesta espectral de la vegetación a múltiples escalas espaciales y temporales (Pérez-Cabello et al., 2021). Por ejemplo, las imágenes del programa Landsat se han convertido en la fuente de información más utilizada (Chuvieco et al., 2020) para generar índices espectrales pre- y post-fuego y llevar a cabo análisis de series de temporales con algoritmos de detección de cambios (Viana-soto et al., 2022). No obstante, los cambios en la estructura de la vegetación también deben ser considerados para una evaluación integral de la resiliencia forestal al fuego. Los sensores LiDAR aerotransportados son capaces de registrar la estructura tridimensional de la vegetación y del terreno subyacente usando la tecnología láser (Roussel et al., 2020). Son numerosos los estudios que hacen uso de estos sensores para estimar los atributos del bosque, cuantificar las alteraciones estructurales post-incendio (Gelabert et al., 2020), evaluar la severidad del fuego (Montealegre et al., 2014; García et al.,

2020) y analizar la recuperación de la vegetación (Martín-Alcón et al., 2015; Gordon et al., 2017).

En este contexto, el objetivo principal de este trabajo es proporcionar información sobre cómo se ha recuperado la estructura del bosque en diversos incendios ocurridos en comunidades de pinares mediterráneos y submediterráneos (*Pinus halepensis* Mill., *Pinus nigra* Arnold *y Pinus sylvestris* L.) mediante datos de campo y nubes de puntos LiDAR de baja densidad. Los objetivos específicos que se derivan del anterior son: a) evaluar la magnitud de las diferencias estructurales entre las zonas quemadas y control; b) analizar las diferencias entre estratos de vegetación mediante composiciones de color creadas a partir de métricas LiDAR.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde con diecisiete incendios de más de 100 ha ocurridos entre 1978 y 2008, que se distribuyen por el sector noroccidental y central de Aragón (Figura 1). Los perímetros proceden de la base de datos de incendios forestales del Gobierno de Aragón (Dirección General de Gestión Forestal) y de productos cartográficos obtenidos mediante técnicas de teledetección en el marco del proyecto de investigación GA-LC-042/2011 (Caixa-DGA) (Jiménez-Ruano et al., 2016). Estos incendios se pueden agrupar en tres grandes marcos geográficos:

- Incendios localizados en las sierras occidentales del Prepirineo oscense y zaragozano: se caracterizan por espacios cubiertos por comunidades de carácter submediterráno dominadas por *Quercus gr. cerrioides* (Willk y Costa) y, en menor medida, por *Quercus ilex* L.; pinares de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* Arnold y formaciones arbustivas dominadas por *Buxus sempervirens* L., *Genista scorpius* L., etc.
- Incendios del sector central del valle del Ebro: formaciones arbóreas dominadas por *Pinus halepensis* L., acompañadas por *Quercus coccifera* L. y otras especies típicas del matorral mediterráneo y pastizales xerofíticos.
- Incendios ubicados en el Sistema Ibérico zaragozano: cubiertas dominadas por matorrales incluidos en la alianza mediterránea *Rosmarino-Ericion*, encinares y plantaciones de *Pinus pinaster* (Aiton) y *Pinus halepensis* L.

Desde el punto de vista de la estrategia reproductiva tras el fuego, esta muestra de ecosistemas contiene especies vegetales con tres tipos básicos de respuesta: reclutadores obligados dominados por *Pinus halepensis*, que posibilitan una recolonización de tipo endógeno; sistemas pasivos de defensa de germinación exógena, como las comunidades dominadas por *Pinus nigra* y *Pinus sylvestris* y; rebrotadores obligados mediante yemas adventicias, que reúnen a fanerófitos y macro-fanerófitos pertenecientes al género *Quercus* (*ilex, gr. cerrioides, coccifera*).

2.2. Datos de campo

Se han utilizado 33 áreas test (AT) distribuidas en los diecisiete incendios seleccionados. Su localización tiene en cuenta la variabilidad de la zona en función de diferentes variables: formación vegetal, topografía, litología y accesibilidad. Cada AT se compone de un sector quemado (SQ), localizado dentro del perímetro del incendio, y de un sector no quemado o control (SC), ubicado fuera del incendio, ambos de 100 m^2 de superficie (Tabla 1). En estos sectores se realizó, entre abril y junio del año 2013, un diagnóstico de la vegetación mediante inventarios florísticos y fisionómico-estructurales siguiendo la metodología de Bertrand (1966). Para este trabajo se ha utilizado el porcentaje de recubrimiento vegetal estimado en los siguientes estratos (E): E1 - arbóreo (>5 m); E2 - arborescente (3 m a 5 m); E3 - arbustivo (1 m a 3 m); E4 - subarbustivo (0,5 m a 1 m); y E5 - herbáceo (<0,5 m).

2.3. Datos LiDAR y procesamiento

Los datos LiDAR fueron capturados entre agosto y diciembre de 2010 y entre enero y febrero de 2011 por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Se utilizaron sensores aerotransportados de pulsos discretos de huella pequeña (LEICA ALS50-II y ALS60), con una densidad nominal de 0,5 puntos/m^2, y una precisión vertical de 0,40 m. El tratamiento de los datos y el posterior cálculo de variables estructurales de la vegetación (métricas estadísticas) se ha llevado a cabo utilizando el software FUSION v. 4.40 del Servicio Forestal de EE.UU. (McGaughey, 2022).

Por un lado, la métrica de densidad vegetal (DV) se ha obtenido utilizando el comando

"*DensityMetrics*". La DV, que se expresa en porcentaje, se define como la proporción de retornos de vegetación en cada uno de los estratos descritos anteriormente respecto del total de retornos de vegetación dentro de una celda dada. Esta métrica sirve para indicar el grado de dominancia de un estrato vegetal frente a otro. Para su cálculo ha sido necesario el uso de los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) de 5 m de resolución espacial disponibles en el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) con el fin de normalizar los valores de altura de los retornos láser. Una vez obtenidas las capas ráster de DV a una resolución espacial de 15 m para cada estrato en formato DTM, el comando "*DTM2ASCII*" se ha utilizado para convertirlas en formato ASCII, que es legible por el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcMap 10.7.1. Se ha optado por esta resolución espacial porque se considera adecuada teniendo en cuenta la baja densidad de los datos LiDAR y el tipo de vegetación.

A continuación, se ha realizado una extracción de valores de DV por estratos en ArcMap a partir de las coordenadas de los centroides de los SQ y SC con tres tamaños diferentes (30 m, 100 m y 300 m), con el propósito de analizar qué dimensiones se ajustan mejor a los datos de campo obtenidos en las AT.

Por otro lado, la métrica de cerramiento del dosel vegetal (CD), expresada en porcentaje, se ha obtenido mediante el comando "*Cover*", que calcula la proporción de primeros retornos por encima de un umbral de altura determinado por cada estrato respecto del total de retornos (incluidos los de suelo) en una celda. Al igual que en el caso del cálculo de la DV, se ha adoptado una resolución espacial de 15 m y las capas ráster resultantes para cada estrato se han convertido a formato ASCII para poder realizar una extracción de valores a diferentes tamaños en ArcMap.

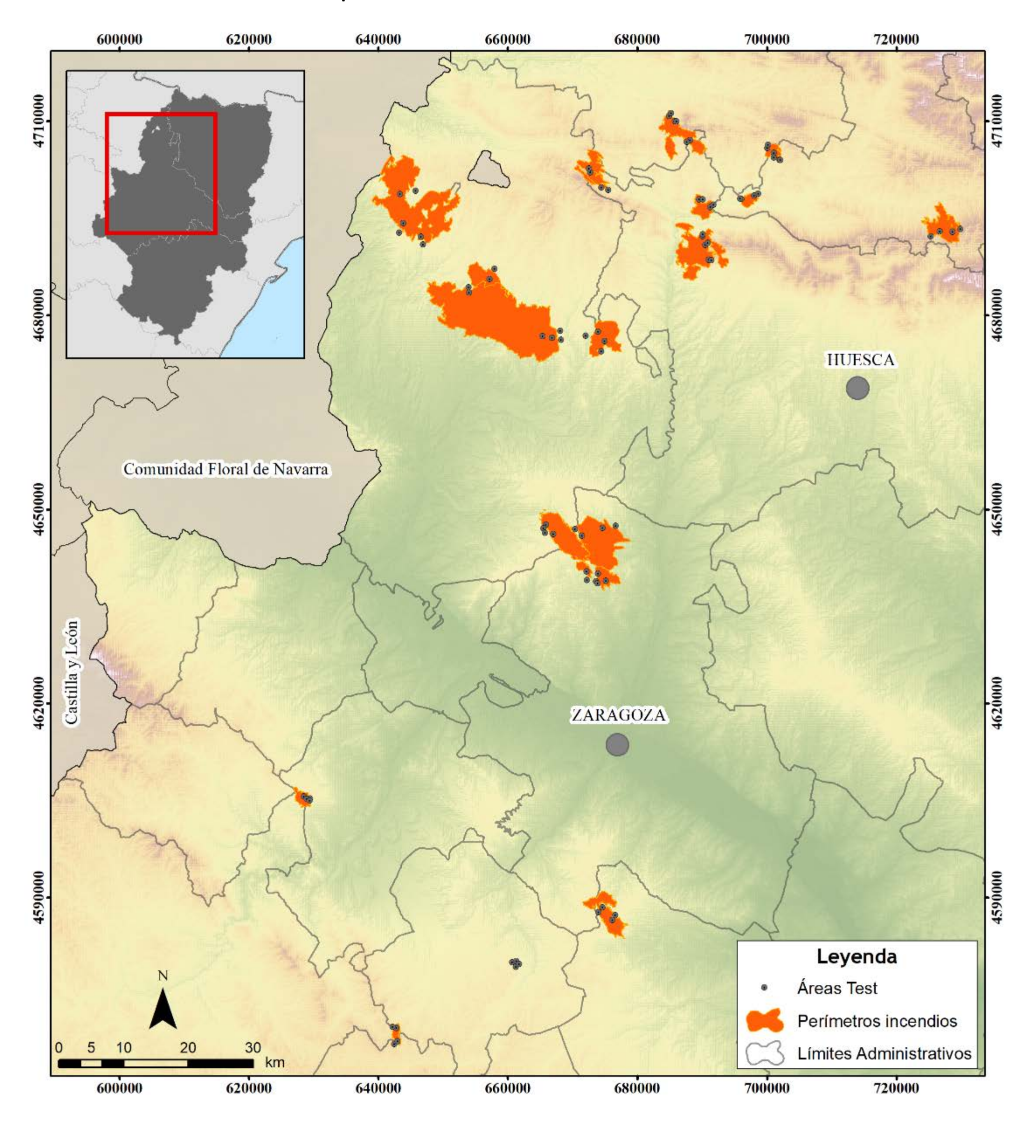


Figura 1. Mapa de localización de los incendios forestales seleccionados y de las áreas test.

2.4. Análisis estadístico de las diferencias estructurales

Dada la estructura pareada de las observaciones (cada observación en una zona quemada tiene su correspondencia en un área control no quemada) y la ausencia de normalidad de la muestra, se ha utilizado la prueba de suma de rangos Wilcoxon, que es un test no paramétrico para comprobar la heterogeneidad de dos muestras independientes. Dicho análisis estadístico se ha llevado a cabo con los valores de recubrimiento vegetal estimados en campo, y con los valores extraídos de las métricas de densidad y de cerramiento vegetal.

2.5. Composiciones de color para la visualización de las diferencias entre estratos

Para sintetizar y representar cartográficamente la estructura de las formaciones vegetales colonizadoras de las zonas incendiadas, se ha utilizado la información de recubrimiento por estrato y su proyección en dispositivos digitales de visualización para generar composiciones de color Rojo-Verde-Azul (en inglés, Red-Green-Blue; RGB) basadas en el proceso aditivo de formación del color. En este caso, en el rojo se ha proyectado el sumatorio de los recubrimientos de los estratos 5 y 4 (los de menor porte), en el verde, la información del estrato arbustivo (1-3 m) y en el azul, el sumatorio de la información de los estratos superiores (>3 m). Teniendo en cuenta la distribución y asignación de los niveles de recubrimiento por estrato, el blanco se asociaría a cubiertas que muestran proporcionalmente alto recubrimiento en los tres estratos. El descenso proporcional en el recubrimiento daría lugar a la gama de grises hasta llegar al negro, que representaría zonas en las que no hay vegetación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Diferencias estructurales mediante datos de campo

Como se muestra en la Figura 2, se puede afirmar que las comunidades vegetales que surgen tras el fuego presentan tres características: menor recubrimiento medio por estrato, muy poco desarrollo de los estratos superiores y mayor desarrollo de los estratos inferiores en relación con los que muestran las comunidades de las que proceden. Desde el punto de vista fisionómico, en los SC el recubrimiento promedio por estrato, sin distinguir entre tipo de pinar, se sitúa en un 38,20%, es decir, diez puntos por encima con respecto a los sectores quemados (28,90%). Este diferente protagonismo de la vegetación, en términos de superficie ocupada, no se reproduce de igual manera en cada uno de los estratos, de hecho, en algunos de ellos la vegetación regenerada tiene un mayor protagonismo (Tabla 1). Este último extremo se relaciona con uno de los efectos más persistentes en los ecosistemas afectados por el fuego: la desarticulación fisionómica de las formaciones afectadas independientemente del tipo de comunidad vegetal (Angeler y Allen, 2016). Se puede reseñar el decremento generalizado en los niveles de recubrimiento vegetal -porcentajes acumulados por estratos- y el mayor desarrollo de los estratos inferiores, muestras evidentes del todavía inconcluso proceso de recuperación y del menor grado de evolución de las formaciones reconstruidas.

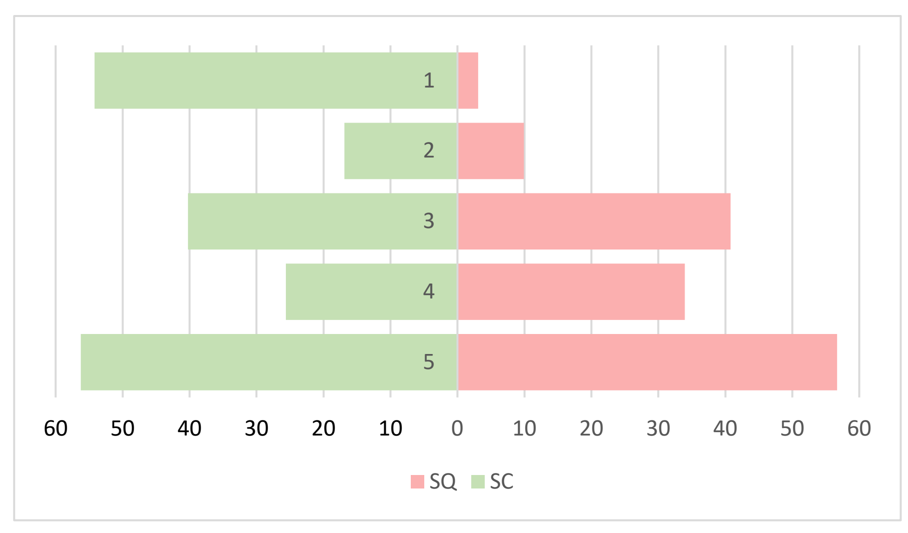


Figura 2. Pirámide de vegetación donde se muestran el promedio de los porcentajes de recubrimiento vegetal por estrato, diferenciando entre sectores quemados (color rosa) y no quemados (color verde).

La Tabla 1 recoge los estadísticos descriptivos de la estructura de la vegetación distinguiendo entre los SQ y SC, con indicación del grado de significación de las diferencias entre sectores (test de Wilcoxon). En el E5 se encuentran porcentajes de ocupación (~56%) y niveles de variabilidad (~29%) muy similares en ambos sectores. En el E4 se registran diferencias significativas en las distribuciones de los valores (p-valor = 0,044), siendo superior el recubrimiento en los SQ (33,97%), que en los SC (25,60%). En el E3 se vuelven a encontrar promedios similares entre sectores (~40 %) (p-valor = 0,965), mientras que en los estratos superiores –E1 y E2- se observan las diferencias más acusadas entre sectores, identificándose distribuciones estadísticamente diferentes (p-valor = 0,001).

Tabla 1. Estadísticos descriptivos del grado de recubrimiento vegetal en campo (%) por estratos (E) y sectores (quemados y control) y significación del test de Wilcoxon (N=33).

Estrato	*Áreas test*	*Min*	*Max*	*Rango*	*Media*	*Desv. estándar*	*p-valor: test de Wilcoxon*
1	Quemado	0,00	75,00	75,00	3,11	12,56	0,001
	Control	0,00	95,00	95,00	54,20	29,12	
2	Quemado	0,00	95,00	95,00	9,94	19,88	0,027
	Control	0,00	70,00	70,00	16,87	15,94	
3	Quemado	0,00	90,00	90,00	40,77	28,82	0,965
	Control	3,00	85,00	82,00	40,26	24,42	
4	Quemado	5,00	90,00	85,00	33,97	21,65	0,044
	Control	3,00	70,00	67,00	25,60	16,45	
5	Quemado	0,00	100,00	100,00	56,69	30,11	0,951
	Control	6,00	96,00	90,00	56,23	28,11	

3.2. Diferencias estructurales mediante datos LiDAR

Como se puede apreciar en la Figura 3, el comportamiento de los datos es semejante en los tres tamaños de parcelas (30, 100 y 300 m), en los cuales resalta el alto grado de dominancia del estrato herbáceo (> 30%) frente al resto, especialmente en los SQ. Dado que no se observan diferencias relevantes entre las pirámides de vegetación, se ha decidido aplicar el test de Wilcoxon a los valores de las métricas obtenidas a 30 m de resolución espacial.

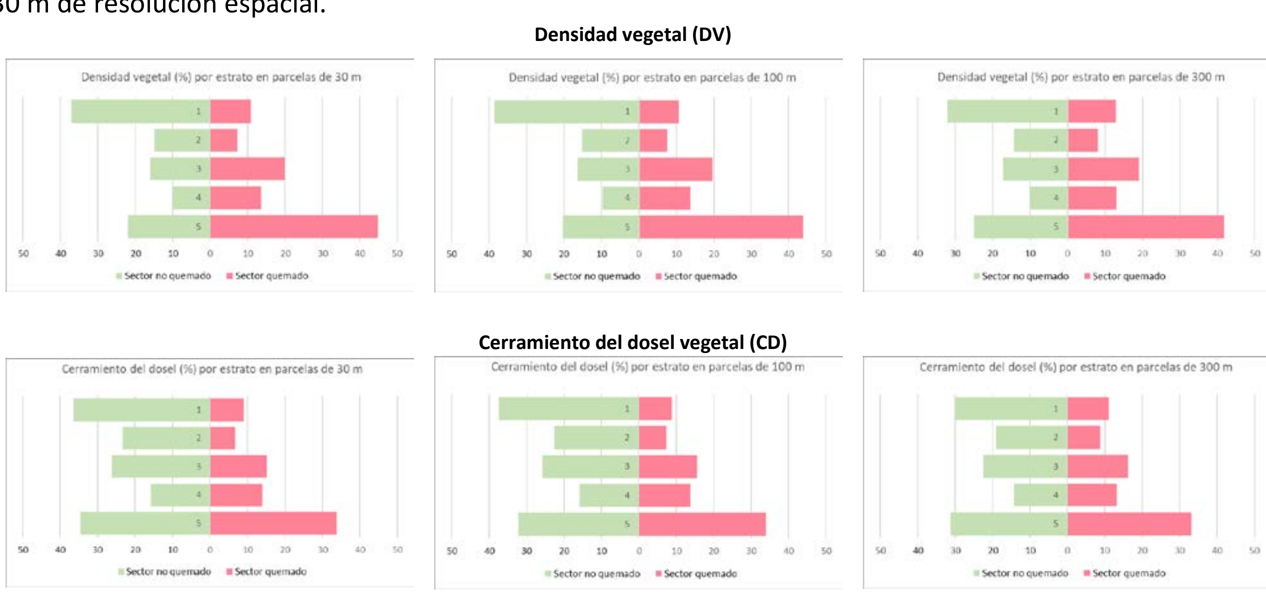


Figura 3. Pirámides de vegetación donde se muestran los valores de Densidad Vegetal y Cerramiento del Dosel por estrato, diferenciando entre sectores quemados (color rojo) y no quemados (color verde).

La Tabla 2 muestra la existencia de diferencias significativas de DV en todos los sectores, excepto para el E3 y el E4. En el caso del CD, las diferencias son significativas en todos los sectores (Tabla 3). Las

características fisionómicas de la vegetación que coloniza las superficies afectadas por el fuego pueden presentar importantes diferencias respecto a su situación previa. La eficacia de las estrategias anatomo-fisiológicas de las especies principales, el grado de intensidad/severidad y el periodo de tiempo transcurrido tras la perturbación, son algunos de los factores que pueden controlar el grado de similitud entre situaciones pre- y post-fuego.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de la métrica de densidad vegetal (%) por estratos (E) y sectores (quemados y control) y significación del test de Wilcoxon (N=33).

Estrato	*Áreas test*	*Min*	*Max*	*Rango*	*Media*	*Desv. estándar*	*p-valor: test de Wilcoxon*
1	Quemado	0,00	75,86	75,86	10,82	17,07	0,000
	Control	0,00	79,99	79,99	37,14	23,88	
2	Quemado	0,00	25,59	25,59	7,19	7,85	0,001
	Control	0,24	44,05	43,81	14,86	10,78	
3	Quemado	0,00	64,11	64,11	20,06	16,59	0,330
	Control	1,11	40,72	39,61	16,01	8,46	
4	Quemado	0,00	34,38	34,38	13,65	9,51	0,105
	Control	0,38	37,26	36,88	9,98	8,35	
5	Quemado	0,00	99,87	99,87	44,88	27,45	0,001
	Control	2,23	81,38	79,14	22,01	19,69	

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de la métrica de cerramiento del dosel (%) por estratos (E) y sectores (quemados y control) y significación del test de Wilcoxon (N=33).

Estrato	*Áreas test*	*Min*	*Max*	*Rango*	*Media*	*Desv. estándar*	*p-valor: test de Wilcoxon*
1	Quemado	0,00	56,98	56,98	9,07	15,35	0,000
	Control	0,00	94,37	94,37	36,47	26,39	
2	Quemado	0,00	35,93	35,93	6,67	9,96	0,000
	Control	0,07	62,20	62,13	23,29	16,80	
3	Quemado	0,00	77,08	77,08	15,09	17,57	0,032
	Control	1,47	70,64	69,17	26,11	16,57	
4	Quemado	0,03	58,70	58,68	13,85	16,11	0,007
	Control	0,29	62,24	61,92	15,81	14,01	
5	Quemado	3,55	89,22	85,66	33,86	24,15	0,000
	Control	3,43	87,58	84,15	34,66	24,27	

Es conveniente reseñar que, otro tipo de factores, en este caso de carácter coyuntural, tales como el régimen pluvio-térmico posterior al fuego, y la distribución de los niveles de severidad del fuego, también afectan a la regeneración a medio y largo plazo y no son incluidos en este análisis. Además, hay que tener en consideración que, aunque todos los sectores son de pinares, cada área contiene características específicas en función de su historial de usos y perturbaciones. Esta circunstancia, por ejemplo, explica la gran variabilidad que presentan los sectores control en cada uno de los estratos de vegetación.

3.3. Composiciones RGB de información sobre la estructura de la vegetación

La Figura 5 recoge cuatro ejemplos de incendios ocurridos entre 1979 y 2008 en distintos tipos de pinar, en los que se muestran los resultados de las composiciones en falso color utilizando la información sobre el cerramiento del dosel vegetal por estratos.

En el incendio de Zuera del año 2008, el más próximo en el tiempo, son dominantes los tonos rojizos con diferente grado de saturación (i.e., pureza del color que, en este caso, se relaciona con el grado de coexistencia de los estratos) y luminosidad (i.e., grado de recubrimiento) que delatan la presencia dominante de los estratos inferiores (herbáceo y subarbustivo, ≥1m; ≈50% de recubrimiento, medido en campo),

dominados básicamente por *Quercus coccifera* y *Brachypodium retusum*. Sin embargo, mientras que en campo se ha observado la presencia de un estrato arbustivo que ocupa en torno al 40%, los datos LiDAR no recogen esta información. Cabe destacar, que en el límite oriental se reconocen pequeñas manchas de tonos azulados poco luminosos, que se corresponden con superficies donde los estratos superiores son los dominantes, aunque estos cubren escasamente la superficie.

En el sector septentrional del incendio de San Juan de la Peña de 1994, se aprecia un patrón cromático caracterizado por tonalidades mayoritariamente granates intercaladas con un moteado negro. Todo ello revela el dominio de estructuras de escasa talla combinadas con zonas sin vegetación, coincidiendo con una superficie que se repobló después del fuego. Desde el punto de vista taxonómico, los estratos inferiores están dominados por herbáceas perennes (especies de los géneros *Brachypodium* y *Festuca*), hemicriptóficos como *Aphyllanthes monspeliensis*; y caméfitos y nanofanerófitos tales como *Buxus sempervirens*, *Genista scorpius* y *Echinospartum horridum.* A los anteriores taxones hay que añadir los pies de pequeño tamaño correspondientes a la especie utilizada en la repoblación, *Pinus sylvestris* (Figura 4 B). Mientras, el estrato arbustivo aparece dominado principalmente por fanerófitos pertenecientes a las rosáceas (*Rubus ulmifolius*, *Rosa canina*, *Rosa arvensis*). Sin embargo, en la parte sur del incendio aparecen sectores amarillentos y turquesas que se asocian a estructuras más desarrolladas en altura dominadas por *Pinus sylvestris* y *Quercus* gr. *cerrioides*.

En el incendio de Caldearenas-Jaca de 1986, se encuentra una organización del color en varios sectores claramente diferenciados. Destacan especialmente los tonos turquesa luminosos y blanquecinos que representan el gran desarrollo de la vegetación localizada en la zona sureste del incendio. Junto a estas zonas, aparecen otras dominadas por estratos inferiores con escaso recubrimiento, que se extiende a modo de bandas de color granate asociadas a las umbrías morfo-topográficas. Los tonos naranjas dominantes en el sector septentrional del incendio se asocian a estructuras complejas dominadas por la combinación de vegetación subarbustiva y arborescente.

Finalmente, en el incendio de Zuera de 1979, sorprende el escaso recubrimiento y la baja talla de las formaciones vegetales colonizadoras (Figura 4 A), a pesar de la gran cantidad de tiempo transcurrido (≈40 años), como así lo pone de manifiesto el dominio de las tonalidades granates, indicadoras del dominio de los estratos < 1 m y su baja luminosidad (valores de recubrimiento promedio medidos en campo <50%). Las especies vegetales dominantes de esta talla son *Rosmarinus officinalis* y *Brachypodium retusum*. Al mismo tiempo son muy significativas, la distribución de grandes manchas cuadrangulares de color negro, correspondientes a zonas de cultivos, incluidas dentro de la superficie quemada. También es significativa la presencia de manchas alargadas de color verde, ajustándose a la red de barrancos de la zona, que evidencian la existencia de un estrato arbustivo denso dominado por *Juniperus oxycedrus*, *Rosmarinus officinalis* y, especialmente, *Quercus coccifera* (>20%). Intercaladas entre estas últimas manchas, también se reconocen otras de color azul (>3 m) protagonizadas por *Pinus halepensis.*

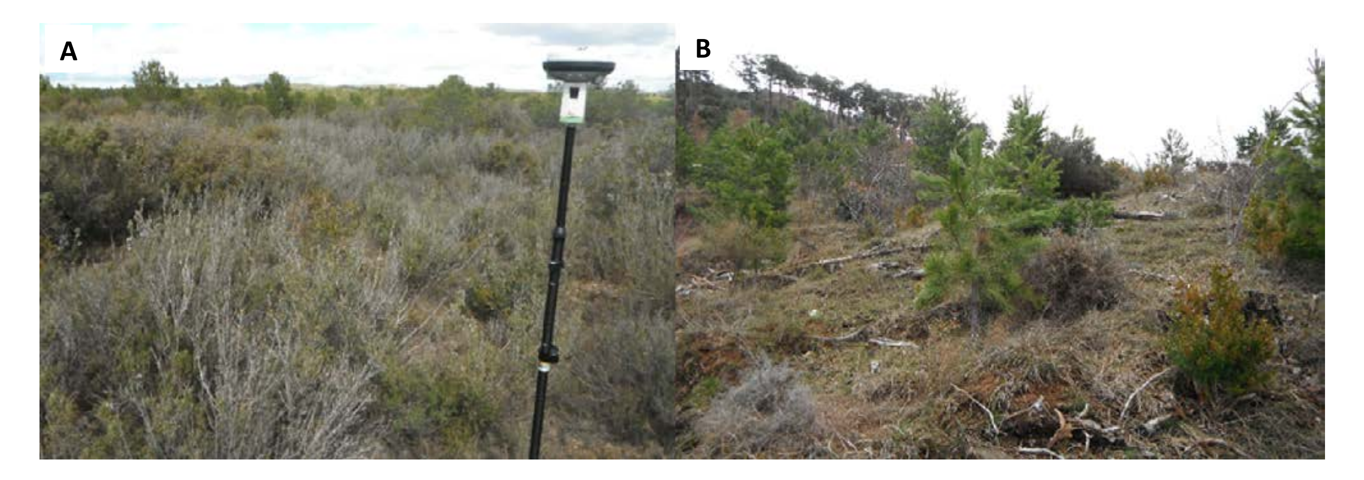


Figura 4. Distribución de la vegetación en el incendio de Zuera de 1979 (A) y San Juan de la Peña de 1994 (B), correspondiente a las tonalidades verdes y granates, respectivamente, que aparecen en las composiciones RGB de la Figura 5.

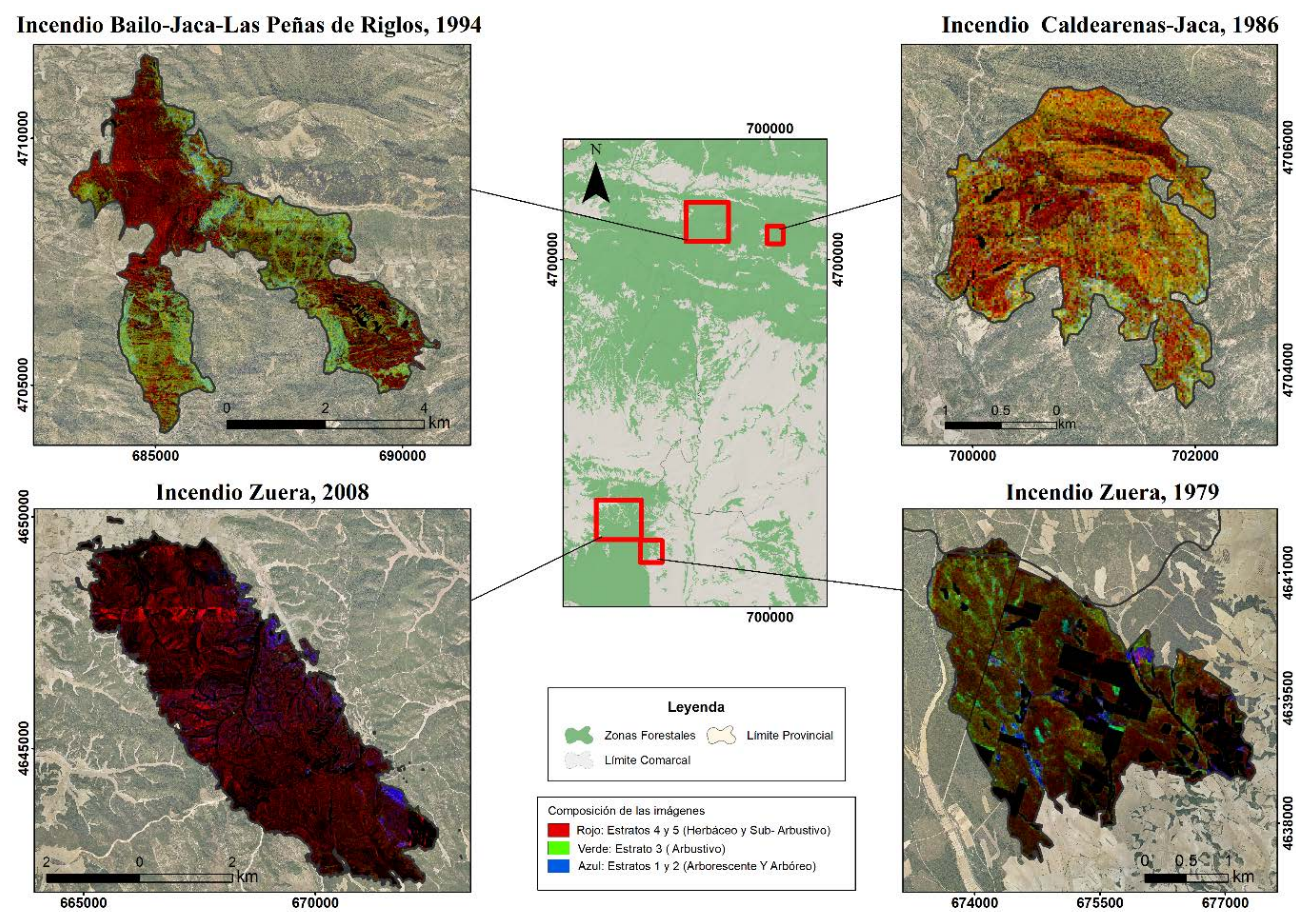


Figura 5. Composiciones de color RGB de los incendios de Zuera (1979), Caldearenas-Jaca (1986), Bailo-Jaca-Las Peñas de Riglos (1994) y Zuera (2008)

4. CONCLUSIONES

Cuando los incendios forestales afectan de manera recurrente a un territorio, conocer la resiliencia de la vegetación es clave para su gestión de una forma más realista. El presente estudio constituye una aproximación metodológica inicial al análisis de la recuperación de los paisajes afectados por el fuego desde un punto de vista estructural, haciendo uso de datos de campo y datos de teledetección LiDAR. Los resultados obtenidos muestran cierta correspondencia entre el recubrimiento vegetal observado en cinco estratos de vegetación y las métricas LiDAR de densidad y cerramiento vegetal. El test de Wilcoxon ha evidenciado que no se dan diferencias significativas entre sectores quemados y no quemados del estrato herbáceo y arbustivo. En el caso de la métrica de densidad vegetal, no se aprecian diferencias significativas en los estratos arbustivo y subarbustivo, mientras que con la métrica de cerramiento del dosel todas las diferencias son significativas. Todo esto parece indicar que los estratos inferiores son más resilientes en comparación con los estratos superiores (1 y 2), los cuales necesitan más tiempo para recuperarse. De hecho, se ha observado que las comunidades vegetales que surgen tras el fuego presentan menor recubrimiento medio por estrato, quedando muy poco desarrollados los estratos superiores frente a los estratos inferiores. También hay que tener en cuenta que las nubes de puntos LiDAR utilizadas son de baja densidad, lo que puede afectar a la capacidad para distinguir los estratos inferiores, sobre todo en situaciones en las que están presentes todos los estratos y se produce un continuo vertical de vegetación, desde el dosel arbóreo hasta el herbáceo. En este sentido, convendrá profundizar más en el uso de nuevas métricas de diversidad estructural y en la posibilidad de agrupar los estratos para tener una estructura más simple a la hora de ser caracterizada por las métricas LiDAR. Asimismo, las composiciones de color generadas con las capas ráster de cerramiento del dosel vegetal por estrato, constituyen una innovación útil para visualizar las zonas quemadas en sus diferentes estadios de regeneración, dependiendo, entre otros factores, de la fecha de ocurrencia del fuego.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con la financiación del Proyecto de Investigación "Dynamic analysis of the Resilience of Fire-Affected Forest Landscapes (PaF) using multisensor spectral indicators" (Referencia Administrativa: PID2020-118886RB-I00), del Programa Estatal de Generación de Conocimiento y Fortalecimiento Científico y Tecnológico del Sistema de I+D+i y del Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad, perteneciente al Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020, de la Agencia Estatal de Investigación (Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España).

5. BIBLIOGRAFÍA

Bertrand, G. (1966). Por une étude géographique de la végétation. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Oest*. 38, 129-144.

Chuvieco, E., Aguado, I., Salas, J., García, M., Yebra, M., Oliva, P. (2020). Satellite Remote Sensing Contributions to Wildland Fire Science and Management. *Curr. For. Reports,* 6, 81–96. https://doi.org/10.1007/s40725-020-00116-5

García, M., North, P., Viana-Soto, A., Stavros, N.E., Rosette, J., Martín, M.P., Franquesa, M., González-Cascón, R., Riaño, D., Becerra, J., Zhao, K. (2020). Evaluating the potential of LiDAR data for fire damage assessment: A radiative transfer model approach. *Remote Sensing of Environment,* 247, 111893 https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111893

Gelabert, P.J., Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., Domingo, D. (2020). Forest structural diversity characterization in Mediterranean landscapes affected by fires using Airborne Laser Scanning data. *GIScience Remote Sens.,* 57, 497–509. https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1738060

Gordon, C.E., Price, O.F., Tasker, E.M. (2017). Mapping and exploring variation in postfire vegetation recovery following mixed severity wildfire using airborne LiDAR. *Ecol. Appl.,* 27, 1618–1632. https://doi.org/10.1002/eap.1555

Jiménez-Ruano, A., Pérez-Cabello, F., Montorio Llovería, R. (2016). Niveles de LAI/fPAR en superficies afectadas por incendios forestales en Aragón. Análisis mediante el producto MCD15A2 de MODIS. *Pirineos*, 171, e019. http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2016.171003

Martín-Alcón, S., Coll, L., De Cáceres, M., Guitart, L., Cabré, M., Just, A., González-Olabarría, J.R. (2015). Combining aerial LiDAR and multispectral imagery to assess postfire regeneration types in a Mediterranean forest. *Can. J. For. Res.,* 45, 856–866. https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0430

McGaughey, R.J. (2022). *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Anal-ysis and Visualization.* United States, Department of Agriculture Forest Service Pacific Northwest Research Station.

Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., Tanase, M.A., De la Riva, J. (2014). Forest fire severity assessment using ALS data in a mediterranean environment. *Remote Sensing*, 6, 4240–4265. https://doi.org/10.3390/rs6054240

Pérez-Cabello, F., Montorio, R., Alves, D.B. (2021). Remote Sensing Techniques to assess Post-Fire Vegetation Recovery. *Curr. Opin. Environ. Sci. Heal*., 21, 100251. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100251

Roussel, J.R., Auty, D., Coops, N.C., Tompalski, P., Goodbody, T.R.H., Sánchez Meador, A., Bourdon, J.F., de Boissieu, F., Achim, A. (2020). lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment,* 251, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061

Viana-Soto, A., García, M., Aguado, I., Salas, J. (2022). Assessing post-fire forest structure recovery by combining LiDAR data and Landsat time series in Mediterranean pine forests. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 108, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102754



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 362-371

Evaluación de la vulnerabilidad a la inundación de las construcciones urbanas bajo rasante: el caso de Palma (Illes Balears)

A. Moragues[1]

[1] *Servicio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (SSIGT) de la Universitat de les Illes Balears. Crta. de Valldemossa, km 7,5. Palma (Illes Balears).*

Alexandre.moragues1@estudiant.uib.cat

RESUMEN: Las construcciones que poseen superficies bajo rasante son, a priori, las que presentan mayor vulnerabilidad a ser inundadas. Es por eso por lo que se ha diseñado un método para la evaluación automatizada de la vulnerabilidad a la inundación de las construcciones bajo rasante, mediante el uso de fuentes de datos abiertos. Se propone la obtención de un nuevo índice de vulnerabilidad de construcciones (Urban Underground Flood Vulnerability Index -U_2FVI-) que permite evaluar las superficies bajo rasante de cada edificación y detectar su grado de vulnerabilidad. El proceso de cálculo se ha automatizado mediante la creación de una herramienta para ArcGIS Pro v.2.8®. Dado que la zona mediterránea constata un incremento de la frecuencia e intensidad de las inundaciones motivado por el calentamiento global, se ha elegido la ciudad de Palma (Illes Balears) como zona de estudio. La ciudad presenta un alto grado de susceptibilidad al peligro de inundación, así lo prueban diversos episodios históricos que han supuesto importantes pérdidas de vidas y bienes. Los resultados muestran como en la zona afectada por los episodios de inundación extraordinarios (T=500), el 3% (9.681) de las construcciones de la ciudad y el 1,4% de la superficie en planta (676.368m^2) de esta, están expuestos al riesgo de inundación. Por lo que al U_2FVI respeta, el índice presenta un gran potencial para análisis a escala de construcciones, pudiendo identificar dónde se encuentran los espacios bajo rasante potencialmente afectados, y de los mismos, cuáles presentan una mayor vulnerabilidad, una herramienta de gran utilidad para la gestión de emergencias y prevención ante el peligro.

Palabras-clave: vulnerabilidad, inundaciones urbanas, construcciones subterráneas, SIG.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones en espacios urbanos, son una de las mayores amenazas naturales para muchas ciudades del mundo (Ahmad y Simonovic, 2012), un riesgo que se ha incrementado debido a una mayor frecuencia de estos episodios extremos (Barredo, 2007), y una mayor concentración de las personas en las ciudades (United Nations, 2018), lo que implica un aumento de las sociedades del riesgo.

Gracias a la *International Strategy for Disaster Reduction* de las Naciones Unidas, se ha podido llevar a cabo un giro en la forma de gestionar el riesgo de inundación, pasando de una visión más centrada en la perspectiva de la ingeniería, a una visión más enfocada en la resiliencia y que integre las medidas para reducir la vulnerabilidad (United Nations- ISDR, 2015). Desde esta perspectiva se contemplan los análisis físicos del riesgo con la evaluación de la situación socioeconómica delante de una determinada amenaza.

El incremento de las sociedades del riesgo (Olcina Cantos, 2009) requiere que estas asimilen la capacidad para adaptarse y anticiparse a estos fenómenos climáticos adversos. Es así pues que este trabajo se enmarca en el ámbito científico de la prevención ante una amenaza de inundación.

1.1. Marco conceptual de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad es un concepto ampliamente utilizado en el campo de la Geografía del riesgo, así como en otras disciplinas que tratan de entender, explicar, evaluar o analizar los diversos riesgos que sufren las estructuras y sistemas antrópicos. Pese a esto, el concepto de vulnerabilidad no dispone de una definición generalmente aceptada dentro de la literatura existente, es por eso por lo que se distinguen tres principales visiones. En primer lugar, una visión física, en la que se asimila la vulnerabilidad a la exposición con la amenaza y la susceptibilidad ante esta (Erena y Worku, 2019; Müller et al., 2011). Una segunda visión es la social,

la cual se basa en un componente puramente social y el condicionamiento humano como la causa última de los impactos provocados por una amenaza, dejando de lado la visión física y estructural (Mileti, 1999; Wisner et al., 2004). Basándose en que la vulnerabilidad no es consecuencia de una amenaza, sino de una situación social, económica y política (Maskrey, 1989). Finalmente, existe una visión holística que incluye tanto los aspectos sociales como los físicos, considerando los impactos i las víctimas de la amenaza, y no solo la amenaza *per se* (Fuchs et al., 2011).

Pues es así como, en este trabajo, se considerará la vulnerabilidad desde una perspectiva física y se comprenderá como el daño potencial al que está expuesto un territorio con unas determinadas condiciones de susceptibilidad ante una determinada amenaza, lo que definirá una distribución territorial de los efectos derivados de la amenaza. Véase pues, la disgregación de los términos de "exposición" y "susceptibilidad", ya que el primero hace referencia a los elementos que pueden ser potencialmente dañados debido a su localización o condiciones físicas (Mileti, 1999; Wright, 2015), mientras que la "susceptibilidad" se entiende como la probabilidad de que los elementos expuestos se vean afectados por una amenaza (Balica et al., 2009).

1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es la elaboración de un índice de vulnerabilidad física frente al riesgo de inundación de los espacios bajo rasante en entornos urbanos, a fin de poder mejorar la resiliencia de los territorios frente a dicho riesgo. El conocimiento de estos espacios bajo rasante serviría para apoyar a los planes de prevención de riesgos, así como a las tareas de ordenación del territorio.

Como objetivos específicos, se plantean los siguientes: desarrollar un método automatizado para evaluar el grado de exposición al peligro de inundación de las construcciones, y calcular su grado de vulnerabilidad física. Como resultado de este método, se propone un nuevo índice de vulnerabilidad de las construcciones bajo rasante frente al riesgo de inundación; en segundo lugar se prioriza el uso de datos digitales abiertos (*opendata*) sobre construcciones y riesgos, que permita hacer extensiva la aplicación del método propuesto a cualquier zona con los datos necesarios para automatizar el proceso de cálculo; finalmente, se pretende testear el método en Palma (Illes Balears), una ciudad mediterránea que ha sufrido diversos episodios catastróficos a lo largo de su historia.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Fuentes de información

Con la finalidad de poder aplicar la metodología que de describirá posteriormente y que ésta sea aplicable de forma sistemática a todo el ámbito español, se van a utilizar los datos abiertos de la Dirección General del Catastro (Ministerio de Hacienda y Función Pública, 2022). Estos datos presentan un gran potencial debido a su escala a nivel de construcciones, y que además disponen de diversa información temática asociada a esta unidad geográfica. También es de gran utilidad el nivel de parcela, identificables a partir de su referencia catastral, lo cual permite la anexión con los archivos alfanuméricos con otra información temática de interés (usos, intensidades, fecha de construcción…), a excepción de su propietario y su valor catastral (García Martín, 2013; Pérez-Morales et al., 2016).

En este caso, se utilizarán exclusivamente las construcciones urbanas, pese a la posibilidad de incluir también las rústicas. Esta consideración exclusiva del parcelario urbano se debe a la escasez de construcciones rústicas por debajo del nivel de rasante, y la falta de solidez en el año de construcción de dichas edificaciones, lo que puede derivar en resultados que no se corresponden con la realidad.

El archivo de las parcelas, en formato vectorial, se compone por los polígonos referentes a cada una de las parcelas definidas en el Catastro y dispone de una única referencia catastral, mientras que el archivo de construcciones, también en formato vectorial, comprende cada uno de los volúmenes construidos de una edificación, por lo que dentro de una misma parcela existen diferentes volúmenes, ergo construcciones.

Es así como para el cálculo del índice propuesto de han utilizado las alturas bajo rasante del archivo de construcciones y que se albergan de forma codificada en números romano y usos individuales del campo 'CONSTRU', juntamente con las alturas sobre el nivel de la calle.

Además, se ha utilizado la fecha del "año de antigüedad efectiva en Catastro" (Ministerio de Hacienda y Función Pública, 2011) de cada una de las parcelas para estimar el año en que se construyeron. Aun así, algunas parcelas disponen de diferentes etapas de construcción o la realización de reformas considerables, pues en estos casos se tomará la fecha más antigua y superior a 1700, suponiendo que no hay propiedades que hayan sido demolidas o sustituidas (Pérez-Morales et al., 2016), y con la finalidad de eliminar valores de

fecha de construcción erróneos o extremos, teniendo en cuenta que se pueden obviar algunas construcciones que datan de antes de 1700.

Por otro lado, para evaluar el factor de susceptibilidad frente a una inundación se utiliza la cartografía de zonas inundables del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020), la cual sigue la Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2007 relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, donde se establece que todos los Estados miembros tienen que llevar a cabo mapas de peligrosidad y mapas de riesgo de las zonas identificadas en la evaluación como Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI).

Así pues, el Estado español traspuso la Directiva mediante el Real Decreto 903/2020, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, y en éste se establecen tres escenarios de ocurrencia de inundaciones fluviales en función de la probabilidad estadística: una probabilidad alta que se asocia a un periodo de retorno de 10 años; una probabilidad media que se asocia a un periodo de retorno de 100 años; y una probabilidad de acontecimientos extremos que se asocia a un periodo de retorno de 500 años (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020), asumiendo que las zonas inundables de los periodos de retorno se mantienen estables en el tiempo.

Además, a estas áreas de inundación se les generará una área de influencia (*buffer*) de un metro hacia el exterior, ya que en ocasiones las delimitaciones de las zonas inundables siguen el trazado de una calle, por lo que la lámina de agua no se solapa con algunas construcciones de uno de los dos lados de la calle (Pérez-Morales et al., 2016), pese a que estas también se verían afectadas en caso de cumplirse el modelo de inundación utilizado, puesto que las plantas bajas y los subterráneos son las primeras zonas que afecta el agua que se escapa del canal.

2.2. Metodología

Para el cálculo del Índice ce Vulnerabilidad de Inundación de los Subterráneos Urbanos (*Urban Underground Flood Vulnerability Index* —*U_2FVI*), se utiliza de base la fórmula de Balica y Wright (2010) y Villagrán de León (2006) donde el índice de vulnerabilidad resulta del producto de la exposición y la susceptibilidad, dividido por la resiliencia. Aun así, para el caso propuesto, se considera una resiliencia constante debido a que el índice propuesto pretende evaluar exclusivamente los factores físicos urbanos, pudiendo así establecer un valor de resiliencia constante, equivalente a 1, por lo que no altera el resultado de la fórmula. Por lo tanto, la fórmula del U_2FVI para cada construcción o unidad geográfica de referencia es:

$$U_2FVI = Exposición * Susceptibilidad \quad (1)$$

Pues es así como ambos factores se consideran necesarios para la existencia de la vulnerabilidad.

A fin de poder comparar los resultados entre diferentes unidades espaciales y diferentes unidades geográficas, se utilizan valores normalizados entre 0 y 1, haciendo así que también el valor final sea entre 0 y 1, el cual se multiplicará por 100 para obtener un resultado entre 0 y 100.

Para el caso del U_2FVI, la exposición estará compuesta por la superficie construida bajo rasante, y la edad de construcción. Estos factores se ponderarán por el 70% y 30%, respectivamente, ya que se considera que la superficie posiblemente afectada implica un mayor grado de exposición física frente a la amenaza, que la edad de construcción, la cual puede, en algunos casos, no ser un factor determinante en un proceso de catástrofe. Se debe decir que siempre sería posible realizar un reajuste de estos coeficientes si se considera adecuado. Este factor de exposición, una vez ponderado, se elevará a la inversa del número de alturas de cada construcción, considerando que el número de alturas es un factor clave y determinante en el impacto que pueda tener el agua dentro de una construcción, ya que, a mayor profundidad, la energía potencial del agua se incrementa y dificulta las tareas de extracción o reparación de los daños ocasionados.

Para el caso de la superficie construida bajo rasante (*Ssr)*, se establecen los parámetros de ponderación a partir de los 10.000 m^2, por lo que cada superficie construida bajo rasante se deberá dividir entre 10.000 para identificar el valor relativo de cada superficie (respecto de una hectárea), teniendo en cuenta todas las plantas existentes. Por lo tanto:

$$Superficie\ bajo\ rasante\ (Ssr) = (\frac{superficie\ construcción * número\ de\ plantas\ bajo\ rasante}{10.000} \quad (2)$$

Se considera que en caso de sobrepasar el lindar de los 10.000 m^2, el valor será siempre 1.

Mientras que para la edad de construcción (*Ec*), se adoptan los valores representados en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores para el campo 'Ec' según la edad de la construcción

Edad (años)	>10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100	<101
Valor	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

En segundo lugar, para la susceptibilidad se utilizan las zonas inundables de la Cartografía Nacional de Zonas Inundables del MITECO (2020). Pues las ARPSI se clasifican de 0 a 1 así como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores para el campo 'ARPSI' según el periodo de retorno

Periodo de retorno (años)	10	100	500
Valor	1	0,5	0,25

En último lugar, el valor obtenido del producto de la exposición y la susceptibilidad se multiplicará por 100. Fruto de esta fórmula, el valor del U2FVI para una construcción se calcula a partir de la fórmula:

$$U_2FVI_i = \left[[(Ssr * 0{,}7) + (Ec * 0{,}3)]^{\frac{1}{Alt}} * ARPSI \right] * 100 \quad (3)$$

Mientras que para una unidad geográfica de mayor entidad resultará de la fórmula:

$$U_2FVI = \frac{\sum_i^n \left[[(Ssr * 0{,}7) + (Ec * 0{,}3)]^{\frac{1}{Alt}} * ARPSI \right] * 100}{n} \quad (4)$$

Donde *n* hace referencia al número de unidades geográficas, siendo *i* cada una de estas unidades. *Ssr* es el valor de la superficie bajo rasante siguiendo la fórmula de cálculo propuesta, *Ec* corresponde al valor relativo para cada edad de construcción. *Alt* hace referencia al número de plantas bajo rasante, y *ARPSI* son las Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación con el valor relativo correspondiente.

El índice U_2FVI proporciona una magnitud escalar con un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 100, que dependerá del grado de exposición a partir de las características de cada edificación, y el grado de susceptibilidad delante del peligro de inundación. Su valor aporta información sobre la vulnerabilidad intrínseca de cada construcción y permite el análisis comparado entre elementos.

El análisis espacial de los datos se lleva a cabo en el SIG ArcGIS Pro v.2.8®. En primer lugar, se debe disponer de la capa de construcciones del Catastro con los atributos de: año de construcción, año vigente y número de plantas bajo rasante; así como los archivos de la cartografía de zonas inundables para el periodo de retorno de 10, 100 y 500 años.

Una vez se dispone de estos archivos, así como se muestra en la Figura 1, se ha de realizar un *buffer* de un metro hacia el exterior de las capas de la cartografía de zonas inundables y, posteriormente se unen mediante la herramienta *Union*, que permite unir las geometrías y los atributos que tengan un mismo nombre. Seguidamente se aplica una unión espacial o *Spatial Join* para trasladar los atributos de cada una de las zonas inundables a la capa de las construcciones, resultando así una capa con todos los elementos necesarios para aplicar la fórmula propuesta.

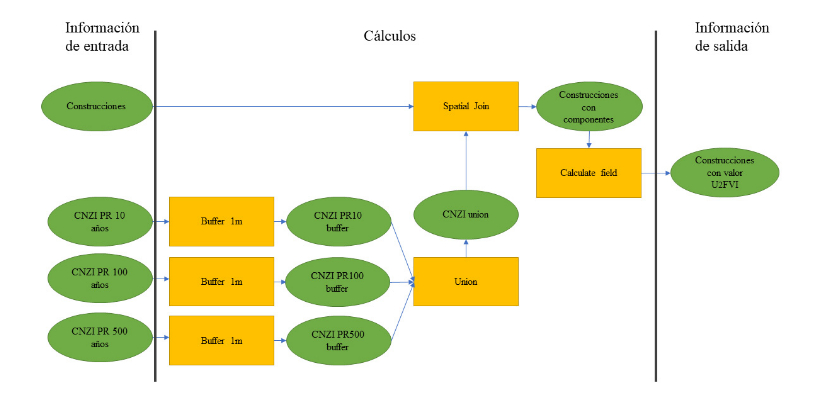


Figura 1. Simplificación del modelo de cálculo a partir de los datos de entrada, procesos intermedios e información de salida, para el cálculo del U_2FVI en un SIG.

3. ÁREA DE ESTUDIO

Palma es una ciudad media, dentro del contexto Español, con una población de 419.366 habitantes el 2021 (IBESTAT, 2022) y que ocupa una extensión de 20.855 ha. Es una ciudad histórica mediterránea de época romana en la costa oeste de la isla de Mallorca, y se asienta sobre una cuenca sedimentaria drenada por ocho torrentes que desembocan en la bahía de Palma (Figura 2). En la zona central de dicha bahía, desembocan el Torrent Gros y el Torrent de Na Bàrbara, dos cursos con su cabecera en la zona axial de la sierra de Tramuntana y son los que presentan una mayor superficie de cuenca y recorrido, pues el Torrent Gros tiene una cuenca de 208 km^2 y una longitud del canal principal de 35 km, y Na Bàrbara dispone de una cuenca de 40 km^2 y un canal principal de 18 km de longitud (Rosselló and Grimalt-Gelabert, 2018). Estas dos cuencas, son las que, según la Cartografía Nacional de Zonas Inundables (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020), suponen una mayor amenaza para la población debido a sus crecidas. Pues es así como estos dos torrentes drenan por el este de la ciudad compacta, pudiendo afectar zonas urbanas con altas densidades constructivas y poblacionales.

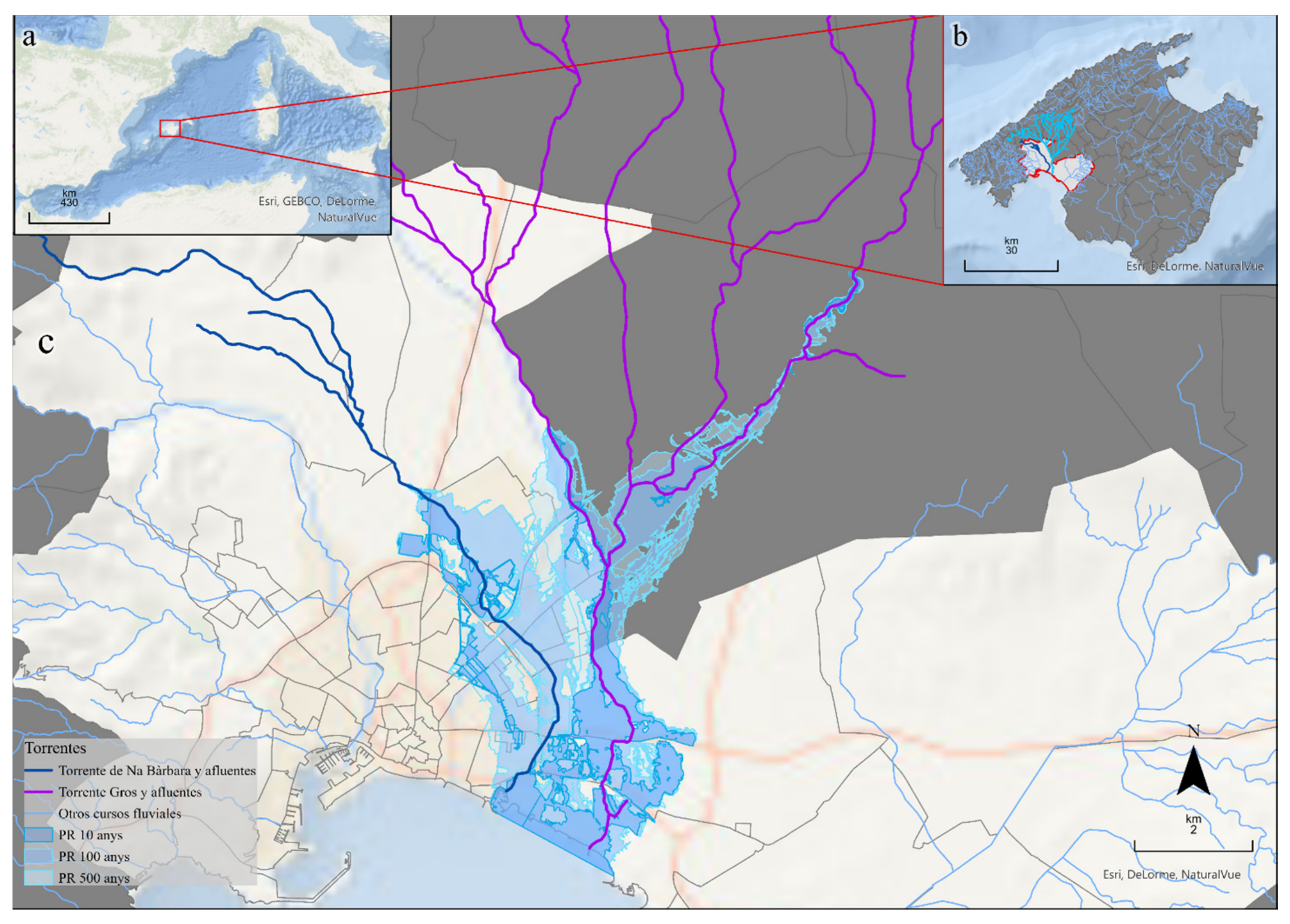


Figura 2. a) Localización de Mallorca en el Mediterráneo occidental. b) Localización de Palma en la isla de Mallorca. c) Localización del torrente Gros y de Na Bàrbara, y la cartografía de zonas inundables del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020).

Los episodios de inundación en Palma se remontan a inicios del crecimiento de la ciudad (Petrus et al., 2018), pues el 1403 Palma sufrió la inundación más importante de su historia hasta el momento, cuando el torrente de Sa Riera mató entre 3.000 y 5.000 personas a causa de una crecida. Además, durante los siglos XVII, XVIII y XIX se sucedieron otros episodios de inundaciones considerables del torrente de Sa Riera, y en el siglo XX de otros torrentes como el de Sant Magí (Grimalt-Gelabert, 1991), lo que supuso un impacto considerable a causa del crecimiento urbano y la ocupación de las llanuras de inundación. Así como ha pasado en los alrededores de los curos de los torrentes Gros y Na Bàrbara, donde la demanda de vivienda en la segunda mitad del siglo XX forzó la construcción sobre zonas con un alto potencial de recurrencia de inundaciones fluviales.

Además, diversas áreas de la ciudad se incluyen dentro del Plan Especial de Protección Civil frente al Riesgo de Inundaciones de la Comunidad Autónoma de las Illes Balears (INUNBAL). Un Plan cuyo objetivo es

hacer frente a cualquier situación grave o de emergencia provocada por inundaciones en las islas Baleares, según se recoge en el Artículo 15.3 de la Ley 15/2015 del Sistema Nacional de Protección Civil. Este Plan establece la organización y procedimientos de actuación de los recursos y servicios propios de la comunidad autónoma en los casos de emergencias ante determinados riesgos, con la finalidad de garantizar la máxima coherencia operativa entre todos los agentes que participan en los operativos desplegados.

4. RESULTADOS

4.1. Automatización del modelo de cálculo

Con la finalidad de automatizar el proceso de cálculo y poderlo adaptar a cualquier ámbito de estudio, se ha diseñado un modelo/aplicación *Python* en ArcGIS Pro v.2.8 ®[1] (*Model Builder*), donde con la introducción del archivo de construcciones del Catastro con el año de construcción en un campo numérico, y las áreas inundables de la CNZI extraídas de la IDE del MITECO (2020), el programa extrae el valor del U_2FVI para cada una de las construcciones catastrales insertadas, siguiendo el método previamente definido.

El programa se divide en tres fases. En primer lugar, a partir del archivo de construcciones, cambia el nombre donde se encuentra el año de construcción a 'AC' para poderlo introducir en el código de cálculo, y crea un campo nuevo donde se pregunta al usuario el año vigente para poder calcular la edad de construcción. A continuación, a partir de un código en *SQL*, se extrae el número de plantas bajo rasante de cada construcción, convirtiendo la codificación en números romanos en valores arábigos enteros. Este proceso se repite de forma automática hasta las 8 alturas subterráneas, de éstas se añade el valor máximo de alturas existentes, o en su defecto, un valor *Null*. Una vez creado el campo con el número de alturas ('Alt'), se calcula la superficie bajo rasante de cada construcción en el campo 'Ssr', y se le otorga el valor relativo correspondiente, todo a partir de una función escrita en *Python*. Seguidamente, se crea el campo de la edad de construcción ('Ec') donde, nuevamente con una función en *Python*, se calcula la edad y se extrae el valor relativo correspondiente a cada construcción. Para finalizar esta primera parte del proceso, se añaden dos campos donde se pregunta al usuario por el peso relativo que se le quiere otorgar a cada uno de los componentes de la exposición: la 'Ssr' y la 'Ec'. Estos se establecen por defecto en 0,7 y 0,3, así como se expone en la fórmula propuesta. Aun así, el cambio de estos dos valores queda a preferencias del usuario, siempre y cuando la suma de ambos sea 1.

La segunda fase se inicia también con el archivo de las construcciones, al cual se le realiza un *buffer* de 2 km para posteriormente cortar los 3 archivos de la cartografía de zonas inundables que el usuario ha añadido. Esto permite reducir el tamaño de los archivos para que el proceso no se entorpezca en exceso, pues la cartografía descargada de la IDE del MITECO es a escala nacional. Una vez cortadas las zonas inundables, se les realiza un *buffer* de 1 metro, como ya se ha explicado anteriormente. A continuación, se modifica el nombre del campo donde se encuentra el periodo de retorno y se realiza una unión de los tres ficheros. Seguidamente se crea un nuevo campo llamado 'ARPSI' y en él se calcula con una función en *Python*, la transformación del periodo de retorno en formato texto al valor relativo deseado y en formato numérico.

Así se llega a la tercera fase, en la cual se aplica una unión espacial para superponer los valores del campo 'ARPSI' sobre las construcciones con los respectivos valores *Ssr* y *Ec*. Finalmente, se añade un nuevo campo ('UUFVI') donde se calcula el resultado para cada construcción. Para terminar y para ofrecer un resultado más comprensible, se eliminan algunos de los campos procedentes de la cartografía catastral y de las acciones intermedias realizadas. El valor resultante se encuentra en el campo 'UUFVI'.

4.2. Resultados espaciales

Fruto de la aplicación del método propuesto, se obtiene el valor del U_2FVI para cada una de las construcciones de la ciudad de Palma. Es así como se detecta que 9.681 construcciones dispondrían de volúmenes bajo el nivel de rasante y se encuentran dentro del periodo de retorno de 500 años, el cual incluye a su vez

[1] Dirección para descargar el modelo, juntamente con una guía breve y los archivos necesarios para testear el funcionamiento: https://www.dropbox.com/sh/qee32itow4zmcti/AABtvBqPmeB1fcxSpHTaOffua?dl=0 [Acceso: 03/06/2022]

el de 100 y 10 años. Así pues, teniendo en consideración que el Catastro urbano de Palma tiene registradas 323.092 construcciones, estas 9.681 construcciones suponen el 3% de las mismas.

En términos de superficie en planta, sin tener en cuenta el número de plantas de cada construcción, 6,76 ha de las 474,50 ha de la ciudad, se verían afectadas por el índice propuesto, lo que supone un 1,43% de esta superficie en planta total.

Dentro del periodo de retorno de 10 años, las construcciones afectadas alcanzan el 0,62%, lo que implica 1.990 construcciones, y con una superficie de 1,33 ha, un 0,3% de la ciudad. Mientras que, en el periodo de retorno de 100 años, las construcciones afectadas llegan a las 7.109, lo que implica un 2,2%, y que en términos de superficie se traduce en 4,96 ha, y un 1% de la superficie construida en planta en la ciudad.

Tabla 3. Número de construcciones y superficie afectada para cada periodo de retorno

	Construcciones		*Superficie*		
	Afectadas	Afectadas (%)	Afectada (m^2)	m2 Afectados (%)	$\overline{X}U_2FVI$
PR 10 años	1.990	0,62%	133.011,79	0,28%	8,12
PR 100 años	7.109	2,20%	496.930,68	1,05%	5,62
PR 500 años	9.681	3,00%	676.367,74	1,43%	4,81

Por lo que respeta al índice propuesto, se observa como las construcciones afectadas se concentran en el eje oriental de la ciudad, entre los cursos de los dos torrentes mencionados, y en el interior del meandro final del torrente de Na Bàrbara, en torno al cual se concentran las construcciones potencialmente más afectadas.

En la Figura 3b se observa la concentración de las dos zonas más afectadas de la ciudad. Es así pues que el ensanche nororiental de la ciudad es la zona en que se acumulan los mayores valores de U_2FVI, pudiendo ser estos superiores a 90, pues estos valores más elevados se encuentran en los barrios de Son Canals y Pere Garau, dos barrios con una renta media por persona entre los 9.000 y 13.000 € (INE, 2019). Así mismo, en la franja central de la Figura 3b se aprecia como se encuentran manzanas completamente afectadas por el índice, así como una gran parte de las manzanas al noreste del curso, tienen al menos una construcción afectada.

Por otro lado, ya en el litoral, la Figura 3c muestra como en la desembocadura de ambos torrentes, también se encuentran agrupaciones de construcciones potencialmente afectadas en caso de inundación.

5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos por el U_2FVI se muestran en una escala de 0 a 100, siendo 0 la ausencia de la vulnerabilidad, y 100 la máxima vulnerabilidad física de las construcciones bajo rasante ante el riesgo de inundación. Estos valores presentan un rango de valores muy amplio ya que los productos de números decimales de la fórmula propuesta supone que los valores cada vez sean más cercanos a 0, aun así, el hecho de elevar el factor de susceptibilidad a la inversa de las alturas genera que los valores para las construcciones con más de una altura se incrementen de forma exponencial, permitiendo así otorgar un mayor peso a las construcciones que disponen de más plantas subterráneas, y que por lo tanto son más vulnerables. Además, este exponente provoca que la evolución del índice no sea lineal, sino exponencial en función del número de alturas.

Además, el hecho de calcular el índice para cada construcción, independientemente de su entorno, permite comparar los resultados de cualquier construcción, independientemente del número de construcciones que se haya utilizado, o el tamaño del núcleo urbano donde se encuentre. Esto no sucede en otros índices como el de Balica et al. (2012), Behanzin et al. (2015), Chang et al. (2021), Erena y Worku (2019) o Salazar-Briones et al. (2020), los cuales utilizan los valores máximos y mínimos de cada serie de datos para establecer valores relativos los elementos o indicadores utilizados para calcular el índice que proponen, impidiendo la comparación entre áreas de estudio de distintas características.

Por otro lado, el hecho de que sea un índice dedicado exclusivamente al componente físico de la vulnerabilidad, permite la posibilidad de ser complementado con otros índices que evalúan también un solo componente como puede ser el social (Aroca-Jiménez et al., 2017; Tascón-González et al., 2020), así como adaptarlo a las características de cada caso concreto, o la modificación/complementación con otros componentes sociales o económicos.

Es por eso por lo que, para futuros trabajos, se pueden cruzar los datos de vulnerabilidad física y estructural, con datos socioeconómicos de renta o de población. Para conocer la relación entre vulnerabilidad física y vulnerabilidad social, o bien para saber cuánta gente vive en un entorno vulnerable, y en qué grado.

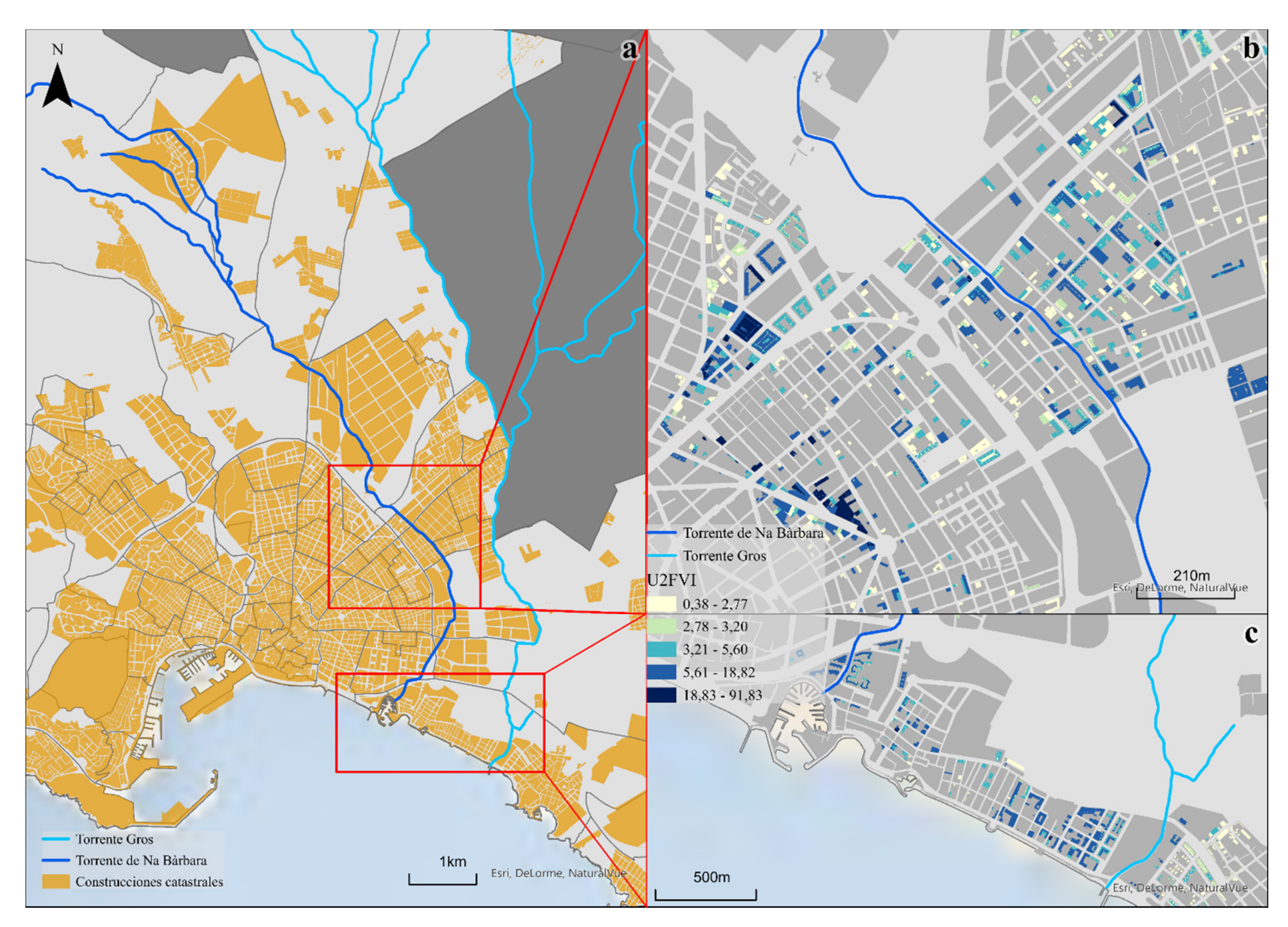


Figura 3. a) Construcciones de la ciudad de Palma y canales principales del torrente Gros y Na Bàrbara. b) Resultados del U_2FVI en el ensanche nororiental de la ciudad. c) Resultados del U_2FVI en el litoral del barrio de El Molinar.

6. CONCLUSIONES

El índice propuesto, el U2FVI, permite la evaluación de los espacios urbanos bajo rasante delante de una amenaza de inundación, el cual dispone de dos grandes aplicaciones gracias a su escala, su composición y el uso exclusivo de datos abiertos.

En primer lugar, y así como se ha avanzado, puede servir para evaluar un entorno urbano aplicando exclusivamente este índice, o se puede complementar con nuevas variables. Esto supone una nueva aportación al campo del conocimiento que trata de evaluar qué espacios son más susceptibles de ser afectados por fenómenos extremos.

Por otro lado, una aplicación más concreta y pragmática es el en campo de la planificación y gestión de riesgos, pues permite a las personas encargadas de organizar los sistemas de prevención y actuación, pre y post catástrofe respectivamente, la identificación de cuáles son las construcciones más vulnerables y en cuáles sería más conveniente aplicar medidas preventivas. Esto es así gracias a la escala de construcciones que utiliza el índice.

Finalmente, el proceso de cálculo del U_2FVI también aporta un conjunto de resultados intermedios como el número de construcciones afectadas, la superficie en planta, el número de plantas o la edad de construcción de cada parcela, lo que permite evaluar en un mayor detalle los factores de exposición.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración del Servicio de Sistemas de Información Geográfica de la Univeristat de les Illes Balears, y especialmente gracias a su Director el Dr. Maurici Ruiz. Quien a su

vez ha sido el tutor del Trabajo de Final de Grado, del cual se ha extraído esta comunicación.

7. BIBLIOGRAFÍA

Ahmad, S. S. y Simonovic, S. P. (2012). Spatial and temporal analysis of urban flood risk assessment. *Urban Water Journal*, 10(1), 26–49. https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.690437

Aroca-Jiménez, E., Bodoque, J. M., Antonio Garcia, J. y Diez-Herrero, A. (2017). Construction of an integrated social vulnerability index in urban areas prone to flash flooding. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(9), 1541–1557. https://doi.org/10.5194/nhess-17-1541-2017

Balica, S. F., Douben, N. y Wright, N. G. (2009). Flood vulnerability indices at varying spatial scales. *Water Science and Technology*, 60(10), 2571–2580. https://doi.org/10.2166/wst.2009.183

Balica, S. F. y Wright, N. G. (2010). Reducing the complexity of the flood vulnerability index. *Environmental Hazards*, 9(4), 321–339. https://doi.org/10.3763/ehaz.2010.0043

Balica, S. F., Wright, N. G. y van der Meulen, F. (2012). A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. *Natural Hazards*, 64(1), 73–105. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0234-1

Barredo, J. I. (2007). Major flood disasters in Europe: 1950-2005. *Natural Hazards*, 42(1), 125–148. https://doi.org/10.1007/s11069-006-9065-2

Behanzin, D. I., Thiel, M., Szarzynski, J. y Boko, M. (2015). GIS-Based Mapping of Flood Vulnerability and Risk in the Bénin Niger River Valley. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 6(3), 1653–1669.

Chang, H., Pallathadka, A., Sauer, J., Grimm, N. B., Zimmerman, R., Cheng, C., Iwaniec, D. M., Kim, Y., Lloyd, R., McPhearson, T., Rosenzweig, B., Troxler, T., Welty, C., Brenner, R. y Herreros-Cantis, P. (2021). Assessment of urban flood vulnerability using the social-ecological-technological systems framework in six US cities. *Sustainable Cities and Society*, 68(February), 102786. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102786

Erena, S. H. y Worku, H. (2019). Urban flood vulnerability assessments: the case of Dire Dawa city, Ethiopia. *Natural Hazards*, 97, 495–516. https://doi.org/10.1007/s11069-019-03654-9

Fuchs, S., Kuhlicke, C. y Meyer, V. (2011). Editorial for the special issue: Vulnerability to natural hazards-the challenge of integration. *Natural Hazards*, 58(2), 609–619. https://doi.org/10.1007/s11069-011-9825-5

García Martín, F. M. (2013). Una metodología para la delimitación y clasificación de las formas urbanas en las ciudades intermedias españolas durante el siglo XX basada en SIG. Seminario Internacional de Investigación En Urbanismo. "V Seminario Internacional de Investigación En Urbanismo, Barcelona-Buenos Aires, Junio 2013," 1199–1215.

Grimalt-Gelabert, M. (1991). Tipologías de inundaciones en Mallorca. En A. Calvo-Cases (Ed.), *Sociedad y Territorio* (pp. 167–172). Asociacion de Geógrafos Españoles.

IBESTAT. (2022). Ibestat: municipi en xifres: Palma. https://ibestat.caib.es/ibestat/estadistiques/municipi-xifres/07040/Palma

INE. (2019). Estadística experimental. *Atlas de distribución de renta de los hogares*. https://www.ine.es/experimental/atlas/experimental_atlas.htm

Maskrey, A. (1989). *Disaster Mitigation: A Community Based Approach*. Oxfam Publishing, 100. http://policy-practice.oxfam.org.uk/publications/disaster-mitigation-a-community-based-approach-121119

Mileti, D. S. (1999). *Disasters by Design: A reassessment of natural hazards in the United States*. Joseph Henry Press.

Ministerio de Hacienda y Función Pública. (2011). Dirección General del Catastro-Fichero informático de remisión de catastro (bienes inmuebles urbanos, rústicos y de características especiales). https://www.catastro.minhap.es/documentos/formatos_intercambio/catastro_fin_cat_2006.pdf

Ministerio de Hacienda y Función Pública. (2022). Dirección General de Catastro - Sede Electrónica del Catastro. http://www.sedecatastro.gob.es/

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/snczi/

Müller, A., Reiter, J. y Weiland, U. (2011). Assessment of urban vulnerability towards floods using an indicator-based approach-a case study for Santiago de Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2107–2123. https://doi.org/10.5194/nhess-11-2107-2011

Olcina Cantos, J. (2009). Cambio climático y riesgos climáticos en España. *Investigaciones Geográficas*, 49, 197–220.

Pérez-Morales, A., Gil-Guirado, S. y Olcina Cantos, J. (2016). La información catastral como herramienta para el análisis de la exposición al peligro de inundaciones en el litoral mediterráneo Español. *Eure*, 42(127), 231–256. https://doi.org/10.4067/S0250-71612016000300010

Petrus, J. M., Ruiz, M. y Estrany, J. (2018). Interactions between Geomorphology and Urban Evolution since Neolithic Times in a Mediterranean City. En M. J. Thornbush & C. D. Allen (Eds.), *Urban Geomorphology: Landforms and Processes in Cities* (pp. 9–32). Elsevier.

Rosselló, J. y Grimalt-Gelabert, M. (2018). *Inundaciones en la ciudad de Palma de Mallorca: distribución de los episodios y tipos de tiempo asociados (2001-2016)*. XI Congreso Internacional de La Asociación Española de Climatología, 245–258.

Salazar-Briones, C., Ruiz-Gibert, J. M., Lomelí-Banda, M. A. y Mungaray-Moctezuma, A. (2020). An integrated urban flood vulnerability index for sustainable planning in arid zones of developing countries. *Water* (Switzerland), 12(608). https://doi.org/10.3390/w12020608

Tascón-González, L., Ferrer-Julià, M., Ruiz, M. y García-Meléndez, E. (2020). Social vulnerability assessment for flood risk analysis. *Water* (Switzerland), 12(2). https://doi.org/10.3390/w12020558

United Nations- ISDR. (2015). Sendai Framework for Disaster Reduction 2015-2030. III UN World Conference on Disaster Risk Reduction, 32. https://www.unisdr.org/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf

United Nations. (2018). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. En Economic & Social Affairs.

Villagrán de León, J. C. (2006). *Vulnerability: A conceptual and methodological review*. UNU-EHS.

Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. y Davis, I. (2004). *At risk: natural hazards, peoples vulnerability and disasters*. https://doi.org/10.4324/9780203714775

Wright, D. (2015). *Methods in Flood Hazard and Risk Assessment*. En World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22982



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 372-380

Estimación del flujo de sedimentos de la DANA de 2019 mediante imágenes Sentinel-2 en la Rambla del Beal (Región de Murcia)

I. Pereira[1], M. Ferrer-Julia[1], S. Alcalde-Aparicio[1], E. García-Meléndez[1], A. Espín de Gea[2], M.F. Carreño[2], E. Colmenero-Hidalgo[1], G. Frías[1], J.A. Cruz[1,3]

[1] *Grupo de Investigación Geología Ambiental, Cuaternario y Geodiversidad (Q-GEO), Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León. Campus de Vegazana, s/n, 24071, León (España).*
[2] *Unidad Tecnológica Geológico-Minera del Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales (CTM). Ctra. de Murcia s/n. 30430, Cehegín (Murcia, España).*
[3] Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. Avda. José Antonio Novais, s/n, 2840-Madrid (España).

iperer02@estudiantes.unileon.es, mferj@unileon.es, salca@unileon.es, egarm@unileon.es, antonio.espin@ctmarmol.es, paqui.cf@ctmarmol.es, ecolh@unileon.es, gfriag00@estudiantes.unileon.es, jcrum@unileon.es

RESUMEN: En 2019 la Región de Murcia sufrió un episodio de DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) que provocó graves inundaciones. En este tipo de eventos es habitual el análisis de la lámina de agua, de hecho, la recurrencia de las precipitaciones de este evento se ha estimado en un periodo entre 200 y 1000 años. Sin embargo, pocos estudios analizan la frecuencia con la que el flujo de sedimentos afecta a los terrenos inundados. El presente estudio estima la peligrosidad del flujo de sólidos mediante Teledetección en una antigua área minera de la Rambla del Beal (Murcia). Esta investigación partió de una imagen de Sentinel-2 previa y otra posterior a la DANA. Tras enmascarar la vegetación, las áreas urbanas y las masas de agua, se generaron dos cocientes de bandas con cada imagen, uno para óxidos de hierro y otro para minerales alterados por el grupo hidroxilo, pues ambos tienen su origen necesariamente en los restos mineros acumulados en la cabecera de la rambla. Estos sedimentos son la huella del alcance del flujo asociado al evento de estudio y pueden correlacionarse con las láminas de agua de los periodos de retorno de 5, 10, 100 y 500 años estimadas por el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO). Para cada lámina de agua se realizó un cruce con ambos cocientes de bandas de cada imagen y se contabilizó la superficie tanto libre de los minerales de estudio, como la que los poseía. En todas las láminas de agua se observó que la situación post-DANA tenía mayor distribución superficial (espacial, areal) en ambos minerales (11.71 ha para óxidos de hierro y 14.61 ha para minerales con el grupo OH^- en la lámina de 100 años). Con ello se estimó que el flujo de sedimentos de la DANA de 2019 pertenecía, como mínimo, a la lámina de agua de la inundación de un periodo de retorno de 100 años.

Palabras-clave: erosión, lámina de agua, multitemporal, Sentinel-2.

1. INTRODUCCIÓN

Entre el 11 y el 15 de septiembre de 2019 en la Región de Murcia tuvo lugar un episodio de DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos), que provocó graves inundaciones. La precipitación, concentrada principalmente entre los días 12 y 13, superó los 200 mm en la Sierra Minera de Cartagena, con un pico máximo de 146 mm en una hora en la estación de La Manga, lo que se corresponde con el récord de precipitaciones acumuladas en una hora desde que hay registros en la Región de Murcia (AEMET, 2019). De hecho, la recurrencia de las precipitaciones producidas durante este evento se ha estimado en un periodo entre 200 y 1000 años (Altarejos et al., 2020).

La Región de Murcia y el sureste español en general, se caracterizan por un clima mediterráneo semiárido con precipitaciones escasas pero intensas. Este régimen da lugar a redes de drenaje conformadas por ramblas, que son cauces temporales. En eventos torrenciales, estos cauces son activados por caudales efímeros pero súbitos con una alta energía, que provocan avenidas que a menudo desbordan el cauce principal. Estos eventos de alta descarga son responsables de movilizar grandes volúmenes de agua y

sedimento produciendo notables impactos sedimentológicos en las zonas de deposición.

Además del clima, la acción humana es uno de los principales condicionantes de la erosión y por tanto de la carga sedimentaria de un evento fluvial. En el entorno del Mar Menor una de las actividades que mayor impacto ha provocado es la minería. La Sierra Minera de Cartagena es un área donde la degradación ambiental de las cabeceras de las cuencas es más que patente tras siglos de minería. Actualmente, se observan toneladas de depósitos de estériles, escombreras y residuos mineros que forman parte del suelo, que es fácilmente erosionado y transportado a lo largo de la red de drenaje durante los episodios de lluvias torrenciales. Los principales elementos metálicos presentes en los estériles son: aluminio (Al), hierro (Fe), manganeso (Mn), bario (Ba), plomo (Pb), zinc (Zn), cromo (Cr), arsénico (As), cobre (Cu), estaño (Sn) y níquel (Ni) (Alcolea, 2015). Muchos de éstos forman parte de minerales y metales secundarios que son espectralmente activos y poseen características de absorción electrónica y vibracional y altos contenidos en óxidos de hierro, que son reflejados en su curva espectral permitiendo su cartografía por técnicas de teledetección (Riaza et al., 2011; Pan et al., 2022). Estas características espectrales pueden ser también identificadas en las áreas de sedimentación fluvial y, de esta manera, analizar la distribución de esos minerales desde las zonas de escombreras de residuos a las zonas de sedimentación donde dichos minerales son depositados por la dinámica fluvial, pudiendo así estudiar el alcance del flujo de sedimentos.

Son limitados los estudios que analizan la extensión de los terrenos afectados por un flujo de sedimentos por los caudales punta de los ríos en avenidas, a diferencia de las láminas de agua ocasionadas en estos eventos. De hecho, se estima que el flujo de sedimentos es medido en menos del 10% de los ríos del planeta (Cohen et al., 2013). Sin embargo, el estudio de la distribución espacial y temporal de la dinámica sedimentaria fluvial es clave para conocer la calidad del agua, las condiciones del hábitat, los ciclos biogeoquímicos y la morfodinámica de los cauces.

En el presente estudio se abordará la cartografía y distribución espacial de la lámina de sedimentos asociada a la DANA de septiembre de 2019 en la cuenca de la Rambla del Beal de la Sierra Minera de Cartagena (Región de Murcia). Esta cartografía se basará en la detección de minerales y metales procedentes de residuos mineros que son arrastrados desde zonas de cabecera hasta las áreas de sedimentación fluvial. Para ello se tendrá en cuenta la respuesta espectral de esos materiales mediante el empleo de cocientes de bandas. Así mismo, la peligrosidad del flujo de sedimentos será correlacionada con las láminas de agua asociadas a los periodos de retorno de 5, 10, 100 y 500 años en la zona de estudio.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1. Área de estudio

El área de estudio es la cuenca de la Rambla del Beal (8.7 km^2) ubicada en el distrito minero de la Sierra Minera de Cartagena, en la Región de Murcia. Esta Sierra limita al norte con el Campo de Cartagena y al sur con el Mar Mediterráneo (Figura 1). La Sierra Minera pertenece a las Zonas Internas de la Cordillera Bética, también denominada "Dominio de Alborán", que se caracteriza por rocas con distintos grados de metamorfismo y una organización superficial compleja caracterizada por una disposición alternante de sierras y cuencas sedimentarias. La mineralización principal está constituida por dos depósitos masivos de sulfuros estratificados, localmente denominados mantos y que fueron explotados antiguamente (Alcolea, 2015). Como resultado de la actividad minera, sobre la Sierra se acumulan vertederos de desechos ricos en sulfuros que experimentan continuos procesos de meteorización, dando lugar a productos supergénicos como óxidos e hidróxidos de Fe y Mg, carbonatos y sulfatos hidratados.

La Rambla del Beal es una de las vías de drenaje de la Sierra Minera que desemboca en el Mar Menor. La rambla nace en la Peña del Águila y tiene una longitud de 8 km. El tramo alto discurre por pequeñas cumbres y valles, pasando cerca de las poblaciones del Llano del Beal y El Beal, donde se localizan los mayores depósitos mineros de la cuenca (Figura 1). Una vez superado El Beal la rambla llega a su tramo bajo, en el que se ensancha y discurre por las Salinas de Lo Poyo, consideradas tanto Lugar de Interés Comunitario (LIC) como Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA). La cuenca de la Rambla del Beal es considerada una de las más contaminadas del entorno del Mar Menor. Aproximadamente un 10.5% de la superficie de la cuenca está ocupada por escombreras (García, 2004).

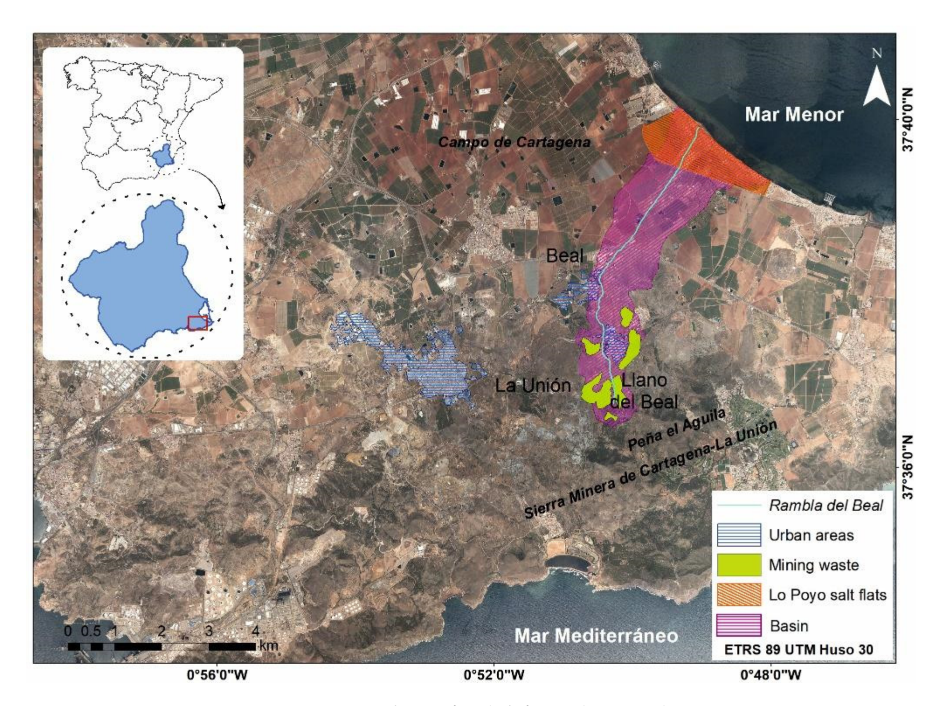


Figura 1. Localización del área de estudio

La Sierra Minera de Cartagena tiene un clima mediterráneo semiárido, que se caracteriza por un régimen pluviométrico de gran irregularidad, con picos máximos en otoño y sequías estivales y una acusada aridez (12 en el índice de Martonne). De media hay menos de 300 mm de precipitación al año, con una marcada irregularidad tanto intra-anual (torrencialidad) como inter-anual (sequías). La tasa de evapotranspiración potencial supera los 900 mm anuales.

2.2. Obtención y pre-tratamiento de las imágenes

Este estudio se ha realizado utilizando imágenes del satélite Sentinel-2. Esta plataforma incluye el sensor MSI (*Multiespectral Instrument*), que es uno de los más apropiados para el análisis de los óxidos de hierro y minerales alterados por el grupo hidroxilo presentes en los residuos mineros, pues varias de sus bandas se sitúan en zonas donde éstos presentan sus principales rasgos de absorción y reflexión (Mielke et al., 2014). En el caso de los minerales de óxidos de hierro, están asociados con procesos electrónicos provocados por los iones ferrosos y férricos que se reflejan en la presencia de dos rasgos de absorción y un pico de reflexión en las longitudes de onda del VNIR (visible e infrarrojo cercano) (Figura 2A). El primer rasgo de estos minerales se sitúa entre 450 y 550 nm y el segundo entre 800 y 1000 nm. El pico de reflexión se encuentra entre los 600 y 700 nm. En ambientes mineros es común la unión entre un metal y el anión hidroxilo (OH^-), generando minerales alterados por el grupo hidroxilo, cómo es el caso de Al-OH (alunita, caolinita), Mg-OH (flogopita) o Fe-OH (epidota, jarosita). La unión entre el metal y el ion se refleja en procesos vibracionales en las regiones SWIR (infrarrojo medio de onda corta) caracterizados por varios rasgos de absorción entre 2080 y 2350 nm (Figura 2B).

Para estudiar la huella de la lámina de sedimentos producida por la DANA de septiembre de 2019 se ha trabajado con una imagen Sentinel-2 previa (19 de agosto) y otra posterior (10 de octubre) al evento. Ambas imágenes han sido descargadas desde el servidor de la web *Copernicus Open Acces Hub (https://scihub.copernicus.eu/)* con un nivel de procesado 1C. Por lo que son imágenes en valores de reflectancia en la parte alta de la atmósfera (TOA), ortorrectificadas con un Modelo Digital de Elevación (MDE) de 90 m x 90 m de resolución espacial y georreferenciadas (European Space Agency, 2019). Sin embargo, en áreas con un relieve acusado, como la Sierra Minera, una ortorrectificación con MDE de baja resolución puede no corregir todas las distorsiones en los valores de los píxeles. Para mejorar los resultados, las imágenes fueron ortorrectificadas de nuevo utilizando el procesador *sen2Cor* (European Space Agency, 2018), de la librería *sen2r* (Ranghetti et al., 2020) del lenguaje de programación R. Para ello se utilizó un MDE de 5 m x 5 m de resolución espacial disponible en el CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica). A la vez que se ortorrectificaban las imágenes, se realizaron correcciones atmosféricas utilizando los parámetros establecidos por la Agencia Espacial Europea por defecto para latitudes medias (European Space Agency,

2019), obteniendo así valores de reflectancia en la parte baja de la atmósfera (BOA).

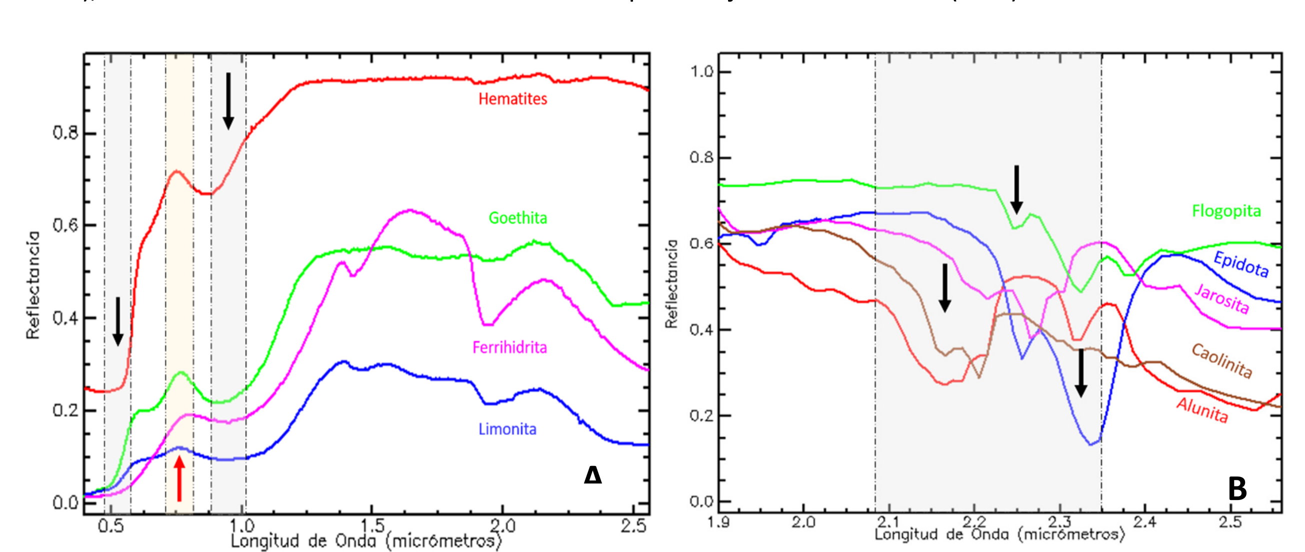


Figura 2. Curvas espectrales de óxidos de hierro (A) y de minerales alterados por el grupo hidroxilo (B) (Fuente: librería espectral del USGS). Entre líneas discontinuas se recogen los rangos de longitudes de onda utilizados para la caracterización de estos minerales. Las flechas negras señalan los rasgos de absorción y las flechas rojas los picos de reflectancia.

A continuación, se excluyó del análisis la vegetación, las zonas urbanas y las masas de agua, con el fin de evitar que estas enmascarasen los rasgos de absorción del hierro o para evitar un ruido excesivo en las imágenes. Para ello, se generó un índice normalizado de vegetación, *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Rouse et al., 1974), considerando como vegetación vigorosa aquellos píxeles con un valor superior a 0.3 (Chen et al., 2021). Para las zonas urbanas se utilizó el *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI) (Zha et al., 2003). Mediante el análisis visual de las dos imágenes se determinó el valor umbral de dicho índice (-0.0092). La última máscara generada fue para eliminar las masas de agua. Con este objetivo se aplicó el cociente normalizado de agua NDWI propuesto por McFeeters (1996). De nuevo, a través de análisis visual se estableció un valor umbral, que en este caso fue distinto según la imagen: 0.05 en la situación pre-DANA y 0.23 en la situación post-DANA. La razón de utilizar dos umbrales diferentes se halla en la diferencia de concentración de algas, fitoplancton o productos químicos del Mar Menor en cada periodo, pues el transporte de fertilizantes durante la DANA generó un incremento en los valores de reflectancia (Banguira et al., 2019).

2.3. Análisis espectral de las imágenes

Una vez completado el pretratamiento de las imágenes se realizaron dos cocientes de bandas, uno para el estudio de los óxidos de hierro y otro para los minerales alterados por el grupo hidroxilo, pues se sabe que ambos necesariamente tienen su origen en los residuos mineros ubicados en la cabecera de la cuenca (Alcolea, 2015).

- *Cociente para óxidos de hierro*

Para la identificación de los óxidos de hierro hay que tener en cuenta el pico de reflectividad en la longitud de onda del rojo (λ_R 600-700 nm), así como la disminución en la zona del verde (λ_R 500-570 nm). Siguiendo estas características Van der Werff y Van der Meer (2016) propusieron el siguiente cociente (1) donde la banda 3 se corresponde con la λ_G y la banda 4 con la λ_R. Como valor umbral se estableció 1.3, estimado previamente por Pereira (2020) en un área cercana a la del presente estudio.

$$\acute{O}xidos\ de\ hierro = \frac{B4}{B3} \tag{1}$$

- *Cociente para minerales alterados por el grupo hidroxilo*

En el caso de la identificación de minerales alterados en los que un metal se había unido con el grupo hidroxilo, se tuvo en cuenta el pico de reflectancia en la banda 11 (λ_{SWIR1}) y la zona de absorciones por los procesos vibracionales recogidos por la banda 12 (λ_{SWIR2}). Siguiendo estas características autores como Van der Werff y Van der Meer (2016) propusieron el siguiente índice (2). Como umbral se utilizó el valor de 1.1 establecido por Franto y Donny (2018).

$$Minerales\ alterados\ por\ OH^{-} = \frac{B11}{B12} \quad (2)$$

2.4. Estimación del periodo de retorno del flujo de sedimentos

El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), dentro del Plan de Gestión contra el Riesgo de Inundaciones siguiendo el Real Decreto 903/2010 tiene disponibles en su web las láminas de inundación estimadas para los periodos de retorno de 5, 10, 100 y 500 años. A fin de conocer la peligrosidad del flujo de sedimentos derivado de la DANA de septiembre de 2019, se cruzaron las dos capas ráster de óxidos de hierro (pre- y post-DANA) y los dos ráster de minerales alterados por el grupo hidroxilo (pre- y post-DANA) con cada una de las láminas de agua de los distintos periodos de retorno disponibles. De esta forma se obtuvieron 16 mapas que mostraban la relación entre la distribución del flujo de sedimentos y los periodos de retorno de la lámina de agua de las inundaciones.

3. RESULTADOS

En la Figura 3 se muestran los resultados del cociente de bandas para la identificación de sedimentos de óxidos de hierro (B4/B3) para la situación pre-DANA (Figura 3A) y para la situación post-DANA (Figura 3B). En el cociente de bandas en el área comprendida dentro de la cuenca se observa cómo tras la DANA en el tramo alto y medio de la cuenca se da una disminución de los sedimentos, mientras que hay un claro incremento de la superficie ocupada por los sedimentos en la desembocadura de la rambla, reflejo de los procesos de trasporte de sedimentos por el flujo generado en la DANA.

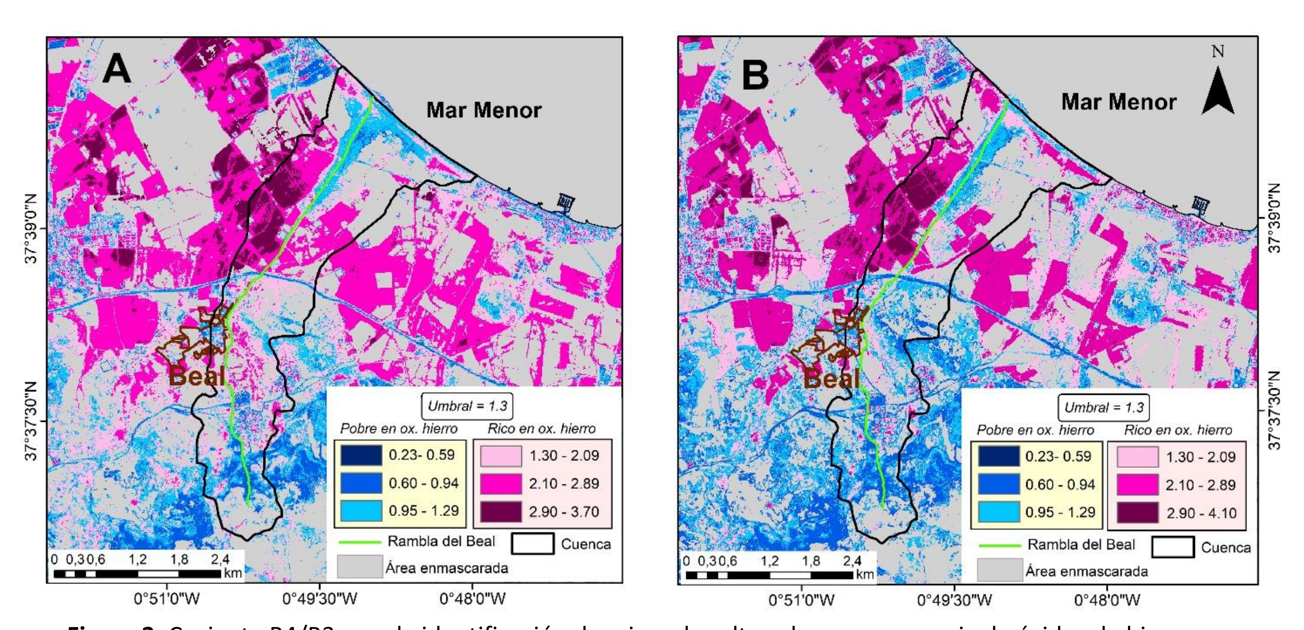


Figura 3. Cociente B4/B3 para la identificación de minerales alterados con presencia de óxidos de hierro en situación A) pre- y B) post-DANA

En la Figura 4 se muestran los resultados del cociente de bandas para la identificación de sedimentos de minerales alterados por el grupo hidroxilo (B11/B12) para la situación pre-DANA (Figura 4A) y para la situación post-DANA (Figura 4B). En el cociente de bandas se observa un aumento de la superficie ocupada por sedimentos, huella del alcance del flujo de sólidos transportados en la inundación.

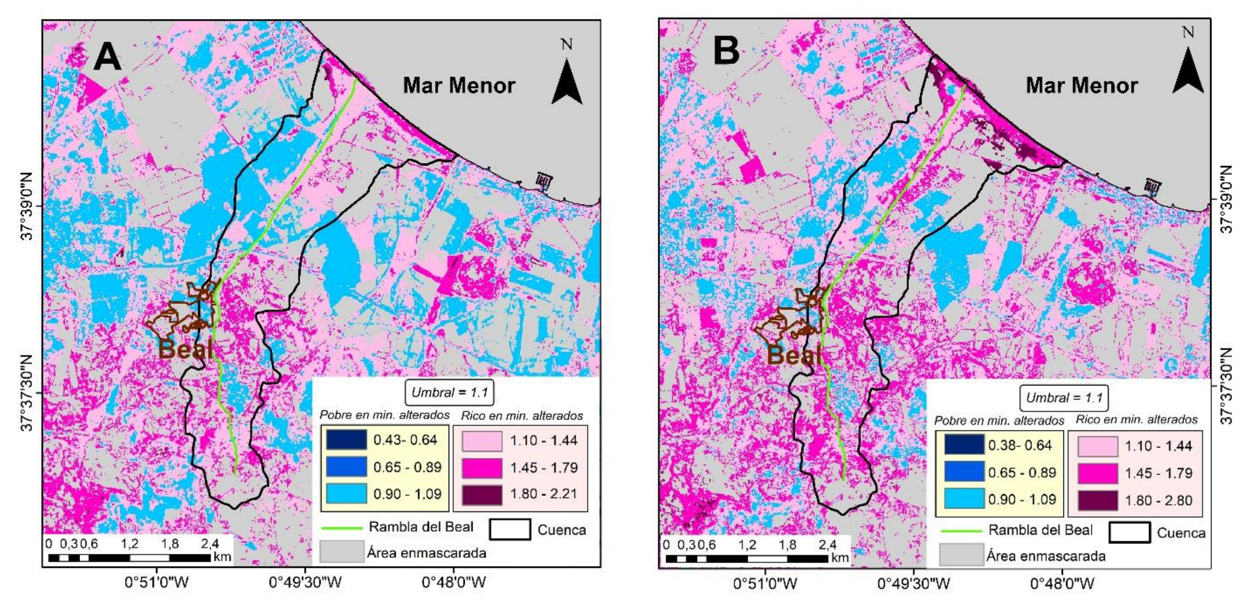


Figura 4. Cociente B11/B12 para la identificación de minerales alterados con presencia del grupo hidroxilo en la situación A) pre- y B) post-DANA.

Tabla 1. Superficie en hectáreas para cada lámina de agua ocupada y libre por óxidos de hierro (naranja) y minerales alterados por el grupo hidroxilo (verde) y promedio del cociente de bandas, todos ellos tanto para el escenario pre como el post-DANA. También, se incluye la diferencia entre los promedios pre- y post-evento para cada cociente.

Periodo de retorno	Óxidos de hierro (B4/B3)							Minerales alterados por el grupo hidroxilo (B11/B12)						
	Pre-DANA			Post-DANA			Diferencia de los promedios	Pre-DANA			Post-DANA			Diferencia de los promedios
	Superficie (ha)		Promedio del índice de bandas	Superficie (ha)		Promedio del índice de bandas		Superficie (ha)		Promedio del índice de bandas	Superficie (ha)		Promedio del índice de bandas	
	Libre	Ocupada		Libre	Ocupada			Libre	Ocupada		Libre	Ocupada		
5 años	38.02	47.00	1.43	26.95	57.67	1.47	-0.04	18.03	66.72	1.16	9.60	75.15	1.29	-0.13
10 años	41.24	56.19	1.46	30.01	67.03	1.48	-0.02	23.24	73.89	1.16	11.65	85.52	1.28	-0.12
100 años	50.55	82.52	1.48	40.06	94.23	1.49	-0.01	32.92	99.48	1.16	18.33	114.09	1.26	-0.10
500 años	62.09	117.31	1.54	49.60	128.46	1.55	-0.01	53.24	125.03	1.15	33.01	145.07	1.24	-0.9

La Tabla 1 muestra, para la lámina de agua de los diferentes periodos de retorno estimada por el MITECO, tanto la superficie ocupada como la libre de óxidos de hierro (en naranja) y minerales alterados por el grupo hidroxilo (en verde). En todos los periodos de retorno se puede observar cómo la situación post-DANA presenta una mayor superficie ocupada por ambos tipos de minerales de estudio respecto a la situación previa. Igualmente, se ha hecho un análisis comparativo para evaluar que, espacialmente, aquellos píxeles que aparecen con óxidos de hierro o minerales alterados por el grupo hidroxilo antes de la DANA, también aparecen después de ella, a fin de asegurar que las variaciones de superficie se deben a un incremento del área inicial y no a una redistribución de los sedimentos. Además, en todos los periodos de retorno se observa cómo la superficie ocupada para cada tipo de sedimento es superior a la superficie sin ellos, aumentando siempre respecto al periodo de retorno anterior. Este último dato permite estimar que la

DANA de septiembre de 2019 tiene un periodo de retorno superior a 100 años, pues la lámina de 500 años para ambos tipos de minerales supera la superficie abarcada por el periodo de 100 años.

En la Tabla 1 también se puede observar cómo el valor promedio del cociente para ambos minerales y en todas las láminas de agua es superior en la situación post-DANA, lo que de nuevo confirma los procesos de sedimentación. Además, se observa que en los periodos de retorno inferiores los procesos de sedimentación son más importantes, ya que hay una mayor diferencia entre el promedio previo y el posterior al evento.

No obstante, el valor promedio de los índices de bandas está evidenciando dos comportamientos diferentes entre ambos tipos de minerales. Por una parte, el valor promedio de los óxidos de hierro tanto en la situación pre-DANA como en la post-DANA aumenta al incrementarse el periodo de retorno. Por otra parte, en los minerales alterados por el grupo hidroxilo para el caso pre-DANA los valores promedio son muy similares, mientras que en la situación posterior van decreciendo al aumentar el periodo de retorno.

4. DISCUSIÓN

La metodología aplicada ha permitido una óptima delimitación del flujo de sedimentos generado en la DANA de 2019 en la cuenca de la Rambla del Beal. Los cocientes de bandas propuestos por Van der Werff y Van der Meer (2016) para Sentinel-2 han demostrado ser capaces de cartografiar los principales sedimentos depositados en la cuenca (óxidos de hierro y minerales con el grupo hidroxilo). Las bandas utilizadas para los cocientes, aunque inicialmente espacialmente inconsistentes han podido ser utilizadas tras su remuestreo a 10 metros. Con ello se ha podido estimar que, más allá de la lámina de inundación de 500 años, apenas existen variaciones en los sedimentos, lo que permite asegurar que el evento se corresponde con un periodo de retorno de entre 100 y 500 años. Estos valores están en concordancia con la horquilla de 200 y 1000 años de frecuencia para las precipitaciones de dicho evento estimadas por Altarejos *et al*. (2020).

Además, el método aplicado muestra la variación en la capacidad de arrastre de los sedimentos en la lámina de agua generada por la DANA de 2019. Esta variación se explica por la disminución de la velocidad del agua en función de la distancia a la vía principal de desagüe, lo que condiciona su distribución espacial. Las diferencias entre los promedios del cociente pre y post-DANA están indicando que los sedimentos han sido mayoritariamente depositados en las superficies correspondientes a las láminas de 5 y 10 años, es decir, la zona más próxima a la vía principal de desagüe y donde el agua tuvo una velocidad y energía superior y por tanto una capacidad de transporte y acumulación de sedimentos mayor, permitiendo una mayor sedimentación de la carga de sólidos cuando su velocidad disminuyó. Sin embargo, en las láminas de 100 y 500 años se observa cómo la cantidad de sedimentos depositados es inferior, pues una gran parte de la superficie de estas láminas se encuentra alejada del flujo principal de desagüe, por lo que el agua que inundó estas áreas tenía menor energía y velocidad y por tanto transportaba una cantidad inferior de sedimentos. Este patrón podría abrir una nueva línea de investigación en la que se relacione, bien de forma cualitativa o bien cuantitativa, la distribución de sedimentos detectados por Teledetección con las variaciones espaciales de la velocidad del flujo de los eventos torrenciales.

Igualmente, por la disposición espacial y temporal de los óxidos de hierro y minerales alterados del grupo hidroxilo se puede observar como cada tipo de sedimento presenta un comportamiento distinto. En primer lugar, el promedio del cociente de los óxidos de hierro aumenta al incrementarse el periodo de retorno, lo que parece incoherente con los procesos de sedimentación generados en función de la variación de la velocidad del flujo vistos anteriormente: si en la lámina de 5 años se dio una mayor sedimentación lo lógico sería que a lo largo del tiempo estas láminas de periodos de retorno menores tuviesen una cantidad promedio de óxido de hierro superior. Sin embargo, esto no es así, ya que los óxidos de hierro se generan por reacciones de oxidación que necesitan una constante exposición atmosférica. Esto supone que los terrenos correspondientes a las láminas de agua de menor periodo de retorno al ser inundados con mayor frecuencia, están expuestos a procesos de lavados más constantes, que van eliminando estos minerales. En cambio, los terrenos de las láminas de 100 y 500 años, aunque son inundados con poca frecuencia y la carga de sedimentos que llega a ellos es menor, al apenas sufrir procesos de lavado, son capaces de alcanzar a lo largo del tiempo una cantidad promedio de óxidos de hierro superior.

En segundo lugar, los minerales alterados por el grupo hidroxilo para todas las láminas de agua parten de unos valores promedio del cociente muy similares en la situación pre-DANA, mientras que, tras la DANA, en todas las láminas aumenta notablemente la cantidad de sedimentos, tal y como muestra el incremento de los valores promedio de su cociente. En este caso los valores promedio del cociente tras la DANA son inferiores al aumentar el periodo de retorno, al contrario que los óxidos de hierro. Además, se observa que

estos minerales alterados no son estables en el tiempo, ya que, en los periodos secos, son o bien transformados en otros minerales o bien lavados hasta alcanzar un punto de equilibrio como el que se observa en la situación pre-DANA. Esto parece indicar que estos minerales son dependientes de este tipo de eventos extremos para su formación.

Estos patrones ya han sido observados en otras áreas mineras como en el rio Odiel en el suroeste España (Riaza et al., 2011) o la en el rio Hengshi en el sur de China (Pan et al., 2022) en donde los óxidos de hierro derivados de residuos mineros son depositados en las áreas que están sometidas a procesos de erosión y lavado poco frecuentes, pues es donde son capaces de perdurar en el tiempo. Al mismo tiempo, los minerales alterados son sedimentados en las áreas geomorfológicamente más inestables y que se corresponden con los terrenos inundados por periodos de retorno más bajos, estando sometidas a procesos de erosión y lavado frecuentes que permiten su formación.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio evidencian el importante proceso de sedimentación que tuvo lugar en la cuenca de la Rambla del Beal durante la DANA de septiembre de 2019. Se ha podido correlacionar el periodo de retorno de la lámina de sedimentos con la lámina de agua de una frecuencia como mínimo de 100 años.

El valor promedio de los cocientes para las distintas láminas de agua ha puesto de manifiesto un comportamiento diferente para los óxidos de hierro y los minerales alterados, si bien ambos han aumentado su superficie tras la DANA para todas las láminas de agua. Se observa que los óxidos de hierro aumentan el valor promedio al incrementarse el periodo de retorno, mientras que los minerales alterados tras la DANA disminuyen su valor promedio al aumentar el periodo de retorno de la lámina. Estas relaciones parecen estar dominadas por los ciclos geoquímicos y la geomorfología.

En definitiva, la Teledetección ha demostrado tener un gran potencial como herramienta para la identificación y el análisis de la peligrosidad de la lámina de sedimentos de un evento torrencial. Sin embargo, sigue siendo necesario profundizar en el conocimiento de la posible relación de la distribución de los sedimentos y las variaciones espaciales en la velocidad del flujo de agua.

AGRADECIMIENTOS

Investigación financiada por FEDER/ Ministerio de Ciencia e Innovación –Agencia Estatal de Investigación/Proyecto ISGEOMIN-ESP2017-89045-R y por el proyecto HYPOPROCKS-PDC2021-121352-100 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR. Inés Pereira ha obtenido una beca del programa "Realización de estudios de doctorado en el marco del programa propio de investigación de la Universidad de León", financiado por "Universidad de León y Programa ULe-Santander".

6. BIBLIOGRAFÍA

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (2019). Avance climatológico mensual septiembre 2019 en la Región de Murcia. http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/ccaa/region-de-murcia/avance_climat_mur_sep_2019.pdf

Alcolea, A. (2015). *Geoavailability of Ni, Cu, Zn, As, Cd, and Pb in the Sierra de Cartagena–La Unión (SE Spain)* [Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena] Repositorio digital de la Universidad Politécnica de Cartagena. https://repositorio.upct.es/handle/10317/5344

Altarejos, L., García, J. T., Carillo, J. M. y García J. M. (2020). “DANA 2019 y aspectos relativos a la estimación y tratamiento del riesgo asociado a inundaciones”, en, López, M. I. y Melgarejo, J. (eds.). Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes. Alicante: Universitat d’Alacant (pp. 143-166.)

Banguira, T., Alfieri, S. M., Menenti, M. y van Niekerk, A. (2019). Comparing Thresholding with Machine Learning Classifiers for Mapping Complex Water. *Remote Sensing*, 11(11), 1-21. https://doi.org/10.3390/rs11111351

Chen, F., Van de Voorde, T., Roberts, D., Zhao, H. y Chen, J. (2021). Detection of Ground Materials Using Normalized Difference Indices with a Threshold: Risk and Ways to Improve. *Remote Sensing*, 13, 1-9. https://doi.org/10.3390/rs13030450

Cohen, S., Kettner, A.J., Syvitski, J.P.M. y Fekete, B.M. (2013). WBMsed, a distributed global-scale riverine sediment flux model: Model description and validation. *Computers & Geosciences*, 53, 80-93. https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2011.08.011

European Space Agency. (2018). Sentinel-2 toolbox. https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-2. fuente del código: https://github.com/senbox-org/s2tbx

European Space Agency. (2019). GMES Sentinel-2 Mission Requirements Document; Technical Report Issue 2 Revision*.* http://esamultimedia.esa.int/docs/GMES/Sentinel-2_MRD.pdf

Franto, S. P. y Donny, L. (2018). Alteration mineral mapping to identify primary tin potential using Landsat 8 images and geographic information system in Rimba Kulit Area, Southern of Bangka Island*. Earth Science, Mineral, and Energy*, 2012, 012021. https://doi: 10.1088/1755-1315/212/1/012021

García (2004). *Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia-España).* [Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio digital de la Universidad Politécnica de Cartagena. https://repositorio.upct.es/bitstream/10317/789/1/cgg.pdf

McFeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

Mielke, C., Boesche, N., Rogass, C., Kaufmann, H., Gauert, C. y de Wit, M. (2014). Spaceborne Mine Waste Mineralogy Monitoring in South Africa, Applications for Modern Push-Broom Missions: Hyperion/OLI and EnMAP/Sentinel-2. *Remote Sensing* 6(8), 6790–6816. https://doi.org/10.3390/rs6086790

Pan, Y., Fu, Y., Liu, S., Ma, T., Tao, X., Ma, Y., Fan, S., Dang Z. y Lu, G. (2022). Spatial and temporal variations of metal fractions in paddy soil flooding with acid mine drainage. *Environmental Research*, 212, 113241. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113241

Pereira, I. (2020) *Análisis espectral de óxidos de hierro mediante imágenes satelitales del Sentinel 2*. [Trabajo Fin de Grado. Universidad de León] Buleria Universidad de León. https://buleria.unileon.es/handle/10612/13357

Ranghetti, L., Boschetti, M., Nutini, F. y Busetto L. (2020). **"**sen2r: An R toolbox for automatically downloading and preprocessing Sentinel-2 satellite data". *Computers & Geosciences,* 139, 104473. https://10.1016/j.cageo.2020.104473, URL: https://sen2r.ranghetti.info.

Riaza, A., Buzzi, J., García-Meléndez, E., Carrère V. y Müller A. (2011). Monitoring the Extent of Contamination from Acid Mine Drainage in the Iberian Pyrite elt (SW Spain) Using Hyperspectral Imagery. *Remote Sensing*, 3(10), 2166-2186. https://doi.org/10.3390/rs3102166

Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J.A., y Deering, D.W. (1974) Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, en: Freden, S.C., Mercanti, E.P y Becker (eds) Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Volume I: Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., 309-31

Van der Werff, H. y Van der Meer F. (2016). Sentinel-2 and Landsat 8 Data Continuity for Geological Remote Sensing, *Remote Sensing,* 8, 1-16. https://doi.org/10.3390/rs8110883

Zha, Y., J. Gao, y S. Ni. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas, *Remote Sensing*, 24(3), 583-594. https://doi.org/10.1080/01431160304987



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 381-390

Aptitud edafoclimática del aguacate bajo escenarios de cambio climático mediante evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica en Puebla, México

E. Pérez Sosa[1], G. R. Granados Ramírez[2], M. A. Saz Sánchez[1], M. L. Hernández Navarro[1]

[1] *Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España.*
[2] *Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, Ciudad de México, México.*

848159@unizar.es, rebeca@geografia.unam.mx, masaz@unizar.es, mlhernan@unizar.es

RESUMEN: La agricultura es una actividad dependiente del clima, por lo que es pertinente incluir aspectos asociados con el cambio climático en la Planificación Agrícola y la Ordenación del Territorio. El objetivo principal de este trabajo consistió en analizar los cambios espaciales de las zonas con características óptimas para el aguacate en el área de estudio. Se utilizaron datos ambientales favorables para el cultivo en formato ráster a una resolución de 900 x 900 m. Se obtuvieron los valores de precipitación y temperatura a la misma resolución espacial para la trayectoria de concentraciones representativas RCP4.5 de los modelos regionales CNRM-CM5, GFDL-CM3 y HADGEM2-ES para los horizontes de futuro cercano y lejano. La metodología utilizada involucró aspectos de la evaluación multicriterio y el análisis espacial por medio del ajuste de las variables a funciones de valor y ponderaciones efectuadas por Procesos Analíticos Jerárquicos (AHP) llevados a un SIG. Los resultados muestran que las áreas óptimas para el aguacate tendrían un incremento de entre 0.6% y 3% para el horizonte 2015-2039 y de entre 1% a 9% para el horizonte 2045-2069, principalmente al norte, este y sureste del estado de Puebla. A pesar de que se mantendrían la mayoría de las zonas óptimas actuales y ocurrirían cambios porcentuales favorables, las transiciones entre las categorías de aptitud, en términos de distribución espacial, indican que al norte y oeste se localizarían las áreas de transición negativa donde las condiciones óptimas actuales serían menos favorables para el aguacate a medio y largo plazo. Es posible que las áreas óptimas existentes sean más amplias por causa de las zonas de transición positiva en las 4 regiones identificadas.

Palabras-clave: proceso analítico jerárquico, zonificación de cultivos, escenarios de cambio climático.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales fines de la Planificación Agrícola es el aprovechamiento de las áreas para los cultivos; si las plantaciones se encuentran en los sitios óptimos, donde las necesidades agroclimáticas y edáficas sean satisfechas con el mínimo de insumos externos, se encaminaría hacia la formulación de una estrategia agrícola idónea y sostenible, ya que estaría en armonía con las características físicas de la zona, por tanto, no implicaría el deterioro de los recursos naturales como sugiere Campos (2005). En consecuencia, bajo ese enfoque se lograrían alcanzar algunas de las metas establecidas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para el 2030, como la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos, el uso de prácticas agrícolas resilientes, fortalecimiento de la capacidad de adaptación al cambio climático y el mejoramiento de la calidad del suelo y la tierra (ONU, 2022).

Debido a que no todos los elementos ambientales influyen de la misma manera en los cultivos, es preciso decidir y asignar un peso a aquellos que tienen mayor relevancia para el establecimiento de plantaciones, su productividad y rendimiento. Por lo tanto, se trata de un problema de toma de decisiones. Los métodos de evaluación multicriterio como los Procesos Analíticos Jerárquicos permiten que la complejidad de una decisión se pueda descomponer en un esquema jerárquico, donde el primer nivel corresponde a la meta que indica el propósito del análisis, y los niveles subyacentes a los criterios y las alternativas que se evaluarán (Moreno, 2002). Igualmente, se trata de un problema de decisión espacial, por lo que los Sistemas de Información Geográfica son considerados herramientas que brindan apoyo para la toma de decisiones

espaciales.

Los sistemas agrícolas en general están bien adaptados a las condiciones promedio normales del clima, sin embargo, con el cambio climático existe la probabilidad de que estas condiciones y los eventos extremos se vean alterados (IPCC, 2018). En este sentido, la agricultura al ser una actividad dependiente del clima resentiría los impactos por estos cambios, ya sea por la alteración de las etapas fenológicas y el desarrollo de los cultivos como señalan Alvarado et al. (2002) y Ruiz (2012), por la variación de producción como indican Torres et al. (2009) o bien, sobre la modificación en los patrones de distribución de las áreas de aptitud, como encontraron para el aguacate en sus respectivas investigaciones Ortiz y Ortega (2015) y Álvarez et al. (2017).

A nivel mundial, México se mantiene como el principal productor y exportador de aguacate (*Persea americana*). Son diversos los territorios mexicanos que presentan condiciones físico-geográficas para el buen desarrollo de esta plantación, los cuales han sido identificados en estudios recientes (Álvarez et al., 2017; Charre *et al*., 2019). El estado de Puebla, en el centro del país, se encuentra entre los de mayor producción por lo que se convierte en un caso de estudio. Se prevé que el consumo de aguacate aumente a escala global durante los próximos años, lo cual requerirá de una planificación agrícola que involucre el fortalecimiento de las plantaciones existentes, así como la identificación y establecimiento de nuevos sitios para la producción. De igual manera, será necesario contar con elementos que permitan reconocer los impactos potenciales por cambio climático.

Por lo anterior, el objetivo principal de este trabajo consistió en analizar los cambios espaciales de las zonas con características óptimas para el aguacate bajo escenarios de cambio climático en el área de estudio. Más allá de describir cómo sería el clima o los valores de las variables en el futuro, el interés se centró en conocer si aumentarán o disminuirán las áreas óptimas para el aguacate.

1.1. Límites, extensión y características geográficas del área de estudio

El área de estudio comprende al estado de Puebla (Figura 1). Se localiza en el centro de México, entre las coordenadas extremas 20°50´24” al norte, 17°51´39” al sur, 99°04´14” al oeste y al este 96°43´00”; tiene una superficie total de aproximadamente 33 919 km^2, dividido en 217 municipios. Su territorio está conformado principalmente por la Sierra Madre Oriental y el Sistema Volcánico Transversal. Entre estos macizos montañosos se encuentran numerosos valles y amplias llanuras con diversas características edáficas. Asimismo, hay una gama de climas que van de los cálidos a los fríos (INEGI, 2017a).

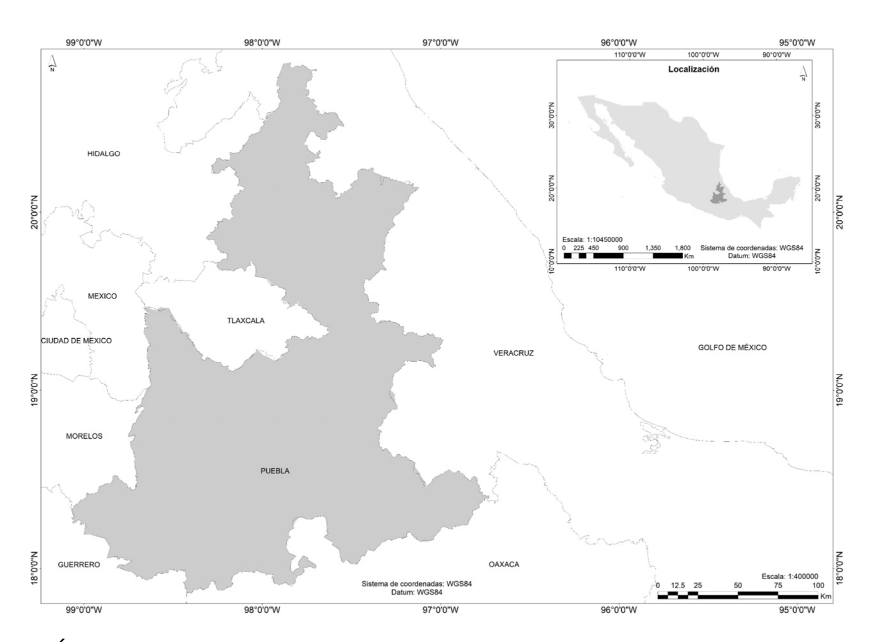


Figura 1. Área de estudio. Fuente: Elaborado por los autores con datos del INEGI (2017a).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada involucró aspectos de la evaluación multicriterio y el análisis espacial por medio del ajuste de las variables a funciones de valor y ponderaciones efectuadas por Procesos Analíticos Jerár-

quicos llevados a un Sistema de Información Geográfica. Esta metodología ha sido empleada en investigaciones de aptitud para cultivos (Sotelo et al., 2016; González et al., 2017; Chivasa et al., 2019).

2.1. Información climática y edáfica

Los datos de temperatura y precipitación mensual en formato ráster a resolución espacial de 900 x 900 m se obtuvieron de las bases de la Unidad Informática para las Ciencias Atmosféricas desde el Repositorio del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM (UNIATMOS, 2014). Información generada a partir de las bases de la WorldClim Global Climate Data y de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional que se encuentran en todo el territorio mexicano, para un periodo de más de 30 años, a las que se les ha aplicado un control de calidad (Fernández *et al*., 2015).

Los valores de temperatura máxima, mínima y de precipitación mensual a futuro se obtuvieron del mismo portal de descarga de la UNAM. Estos valores son el resultado del reanálisis de los datos de distintos modelos climáticos regionales y han sido adaptados para México y Centroamérica. Se sugiere consultar la referencia de Fernández *et al*. (2015) si se desean más detalles acerca de la metodología empleada. Se eligió la trayectoria de concentración representativa RCP4.5 considerada como un escenario de forzamiento medio, y dos periodos a futuro: medio (2015-2039) y lejano (2045-2069), para tres modelos climáticos CNRM (Francia), GFDL (USA) y HADGEM (United Kingdom).

En cuanto a las variables de profundidad y pH del suelo se adquirieron de la Serie II del Conjunto de Datos de Perfiles de Suelos, Escala 1:250 000 del INEGI (2013). Se emplearon métodos de interpolación mediante la distancia inversa ponderada y se utilizó la misma resolución espacial que las variables climáticas.

2.2. Información de uso del suelo y vegetación, erosión del suelo y áreas naturales protegidas

Se tomaron en cuenta los factores que restringen de algún modo el establecimiento de las plantaciones de aguacate. Los datos de uso del suelo y vegetación se obtuvieron del Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (INEGI, 2017b). En cuanto a los tipos de suelos se adquirieron del Conjunto de datos edafológicos. Escala 1:1 000 000 serie I (INEGI, 2005). Mientras que los datos de erosión del suelo provienen del Conjunto de Datos de Erosión del Suelo, Escala 1: 250 000 Serie I (INEGI, 2014). Los polígonos de las áreas naturales protegidas federales de México se descargaron del Catálogo de metadatos geográficos en el portal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (SEMARNAT-CONANP, 2017).

2.3. Etapas de análisis

La primera etapa consistió en la construcción del modelo jerárquico de decisión, donde la meta fue encontrar las zonas con aptitud edafoclimática para el aguacate en Puebla. Los criterios corresponden a las variables ambientales que condicionan la aptitud y las alternativas a cada uno de los pixeles que conforman el área de estudio. Se continuo con la ponderación de las variables; la valoración se realizó mediante una comparación pareada que utiliza una escala numérica equivalente con expresiones verbales desde el software SuperDecisions® de la Creative Decisions Foundation (2020). Se establecieron los parámetros de idoneidad agroclimática y de suelos para el aguacate con base estudios previos (Alcantar, 2009; Gutiérrez et al., 2010; Alcantar y Muñoz, 2012; Romero, 2012; Ruiz et al., 2013). Asimismo, se consultaron a seis expertos sobre el aguacate; 3 investigadores y el resto corresponde a productores y agricultores.

La segunda etapa involucró el ajuste de las variables a una función de valor (curva), cuyo primer paso consistió en definir el rango en el cual se evaluó la curva mediante los valores de las coberturas ráster en el área de estudio. Los valores de función correspondientes fueron evaluados entre 0 y 1, donde 1 es el valor máximo de aptitud. Posteriormente, se obtuvieron las ecuaciones de las curvas de ajuste; para las variables de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y pH la curva ajustada fue la de campana (ecuación 1), porque el comportamiento de las variables, con respecto de la aptitud, en parte es creciente y decreciente. Para la profundidad se empleó una función convexa-creciente (ecuación 2), debido a que, a mayor profundidad del suelo, mejoran las condiciones para las plantaciones.

$$v = e^{-(x-X_{max}/\alpha)^2} \quad (1)$$

Donde:

v*:* valor transformado del criterio

e: exponencial base *e*

x*:* valor original del criterio (capa de entrada ráster)

x_{max}: valor máximo original del criterio (capa de entrada ráster)

α: amplitud de la curva.

$$v = 1 - e^{-\gamma x} \qquad (2)$$

Donde:

v: valor transformado del criterio

e: exponencial base *e*

x: valor original del criterio (capa de entrada ráster)

γ: parámetro de control (ecuación 3):

$$\gamma = -log\left(log\left(1.1 + 0.88\ (10 - S)\right)\right) / log^2(X_{max}) \qquad (3)$$

S = saturación de la curva (curvatura).

Durante la siguiente fase se utilizaron los valores del rango y las ecuaciones de ajuste obtenidas para integrarlas al Sistema de Información Geográfica ArcMap10.5.1® y así construir los mapas de criterios estandarizados (ecuación 4). La fase posterior de esta etapa consistió en la combinación lineal ponderada mediante la ecuación 5, donde cada uno de los valores de los pixeles contiene una alternativa de decisión para la aptitud.

$$v' = (v - v^{\min}) / (v^{\max} - v^{\min}) \qquad (4)$$

Donde:

v'*:* valor estandarizado del criterio

v: valor transformado del criterio

v^{min}*:* valor transformado mínimo

v^{max}: valor transformado máximo.

$$a = \sum_1^i v_i'\, w_i \qquad (5)$$

Donde:

a: valor que representa la aptitud para el aguacate

v_i': valor estandarizado del criterio i

w_i*:* peso del criterio i.

Como resultado se obtiene un mapa de aptitud con valores del 0 al 1. En este caso solamente se seleccionaron aquellos pixeles relacionados con las condiciones óptimas (valores entre el 0.8 y 1). Posteriormente se emplearon como un polígono de mascara los criterios de restricciones para las plantaciones de aguacate conformados por: 1) suelos desfavorables o poco favorables para el aguacate; 2) uso del suelo prioritario (bosques y su vegetación secundaria arbórea, así como las áreas naturales protegidas); 3) uso del suelo no apto (cuerpos de agua y uso del suelo urbano); y 4) grado de erosión del suelo (medio y alto). El resultado de lo anterior es el polígono de las áreas con condiciones óptimas del escenario base o actual.

Para la tercera etapa se realizaron los pasos anteriores, pero las coberturas climáticas del escenario base fueron sustituidas por los ráster correspondientes a los modelos de cambio climático. Las variables de pH y profundidad no fueron modificadas. Enseguida, se calcularon las áreas totales de los polígonos por cada modelo y los cambios porcentuales (ecuación 6).

$$cambio\ porcentual = \Delta_x / x_1 = ((x_2 - x_1) / x_1) * 100 \qquad (6)$$

Donde:

x_1: valor en el escenario base

x_2: valor en el modelo de cambio climático.

Después, se efectuaron distintas operaciones de extracción y superposición de los mapas resultantes. Primero, se unieron los polígonos con condiciones óptimas de los tres modelos para cada horizonte y se interceptó con el de las mismas condiciones, pero del escenario actual, para obtener el nuevo archivo vectorial que denominamos aquí como áreas coincidentes. Los polígonos que no coincidieron con dicha operación evidentemente son áreas nuevas. Para identificar si se trataban de áreas nuevas con condiciones óptimas o de una aptitud menor se utilizaron los valores inferiores a las condiciones óptimas (las cuales pueden considerarse como aptitud media, entre 0.6 y 0.7) conseguidos en el escenario base y su yuxtaposición con áreas nuevas con condiciones óptimas para obtener el polígono que hemos nombrado áreas de transición positiva. Los polígonos de las áreas nuevas que no coincidieron con la operación anterior fueron considerados como zonas donde la transición no fue favorable. Para la definición de las áreas de transición negativa se realizó una comprobación mediante el intercepto de los polígonos de las áreas nuevas que no coincidieron y el de la aptitud media que resultó de la unión de los tres modelos de cambio climático.

3. RESULTADOS

De acuerdo con la información bibliográfica y la consulta a expertos se obtuvo que la precipitación y temperatura mínima son los elementos climáticos más relevantes que considerar para el buen desarrollo del aguacate. En cuanto a la precipitación, el exceso o déficit repercute en la productividad y propicia el desarrollo de enfermedades. Por otro lado, los árboles de aguacate son sensibles a temperaturas bajas, incluso con valores por encima de la helada meteorológica; pero también requieren de cierta cantidad de frío para iniciar la floración. Por último, la temperatura máxima se relaciona con la alteración en la floración y fructificación; si son muy altas y constantes son perjudiciales para las flores y pequeños frutos. Las características edáficas también influyen en las plantaciones; son el pH neutro y suelos profundos, los más relevantes, siempre que se cumplan con los requerimientos de temperatura y agua. Bajo esta lógica se realizó la comparación en pares y se obtuvieron los pesos de la Tabla 1. El valor del índice de consistencia fue de 0.049 lo cual indica la congruencia de las comparaciones.

Tabla 1. Matriz de comparación de los criterios edafoclimáticos mediante AHP en SuperDecisions.

	Prec.	T.mín.	T.máx.	pH	Prof.	Peso (w)
Prec.	1	2	2,89	2,93	3,02	0,37
T.mín.	0,5	1	3,96	2,93	2,98	0,29
T.máx.	0,35	0,25	1	0,34	0,52	0,07
pH	0,34	0,34	2,93	1	2,04	0,16
Prof.	0,49	0,34	1,91	0,49	1	0,10

Con base en los requerimientos edafoclimáticos óptimos para las plantaciones referidos en la literatura, y en los valores mínimos y máximos de las variables en el área de estudio, el ajuste de los parámetros se conformó por los valores de la Tabla 2.

Tabla 2. Valores utilizados para el ajuste de los datos a las funciones de valor.

Criterio	**Requerimientos**	**Mínimos**	**Máximos**	X_{max}	**α**	**γ**	**S**
Prec.	1200-1800	225	3909	1600	700	NA	NA
T.mín.	8 -14	-7	20	12	6	NA	NA
T.máx.	23 -28	3	35	25	7	NA	NA
pH	5,5 -7,5	3	9	6	7	NA	NA
Prof.	> 100	6	200	200	NA	0,17	4

En términos generales, la superficie óptima para el aguacate en Puebla tendría un incremento bajo los tres modelos y los dos horizontes analizados (Tabla 3). Este aumento representa entre 0.6% y 3% para el horizonte 2015-2039 y entre 1% a 9% para el horizonte 2045-2069 y solamente en un modelo (CNRM a 2015-2039) indica una disminución.

Tabla 3. Superficie total con condiciones óptimas para el aguacate en Puebla y sus cambios porcentuales bajo modelos de cambio climático en dos horizontes temporales.

2015-2039						
Base (ha)	CNRM (ha)	Diferencia (%)	GFDL (ha)	Diferencia (%)	HADGEM (ha)	Diferencia (%)
85 355	84 351	-1,18	88 330	3,49	85 941	0,69
2045-2069						
Base (ha)	CNRM (ha)	Diferencia (%)	GFDL (ha)	Diferencia (%)	HADGEM (ha)	Diferencia (%)
85 355	86 404	1,23	92 943	8,89	93 533	9,58

Como muestra la Figura 2, para el 2015-2039 en la franja de condiciones óptimas de la región norte, coincidente con la Sierra Madre Oriental en dirección noroeste-este, la mayoría de las áreas actuales se mantienen y aparecen nuevas; esto significa que en condiciones actuales, dichas áreas presentan valores de aptitud por debajo de los requerimientos óptimos que necesita el aguacate, pero bajo escenarios de cambio climático los pixeles ajustados contienen valores que conducen a un cambio de aptitud, en este caso, favorable. En este sentido, lo que podría suceder en esta región es que se ampliara la franja óptima (hacia el norte y sur), abarcando más espacio y contribuyendo al aumento absoluto de la superficie total.

Otro aspecto que resalta en la región norte son las áreas de transición negativa. En el escenario base estas áreas contienen condiciones óptimas, pero contrario a las áreas nuevas, la transición de aptitud es perjudicial, es decir, bajo escenarios de cambio climático tendrían condiciones menos favorables para el aguacate. En las regiones este y sureste no ocurriría la situación antes descrita, por el contrario, las áreas de transición positiva para el aguacate sería el escenario aparente. Mientras que, en la región oeste las condiciones óptimas se localizarían más hacia el norte del polígono actual.

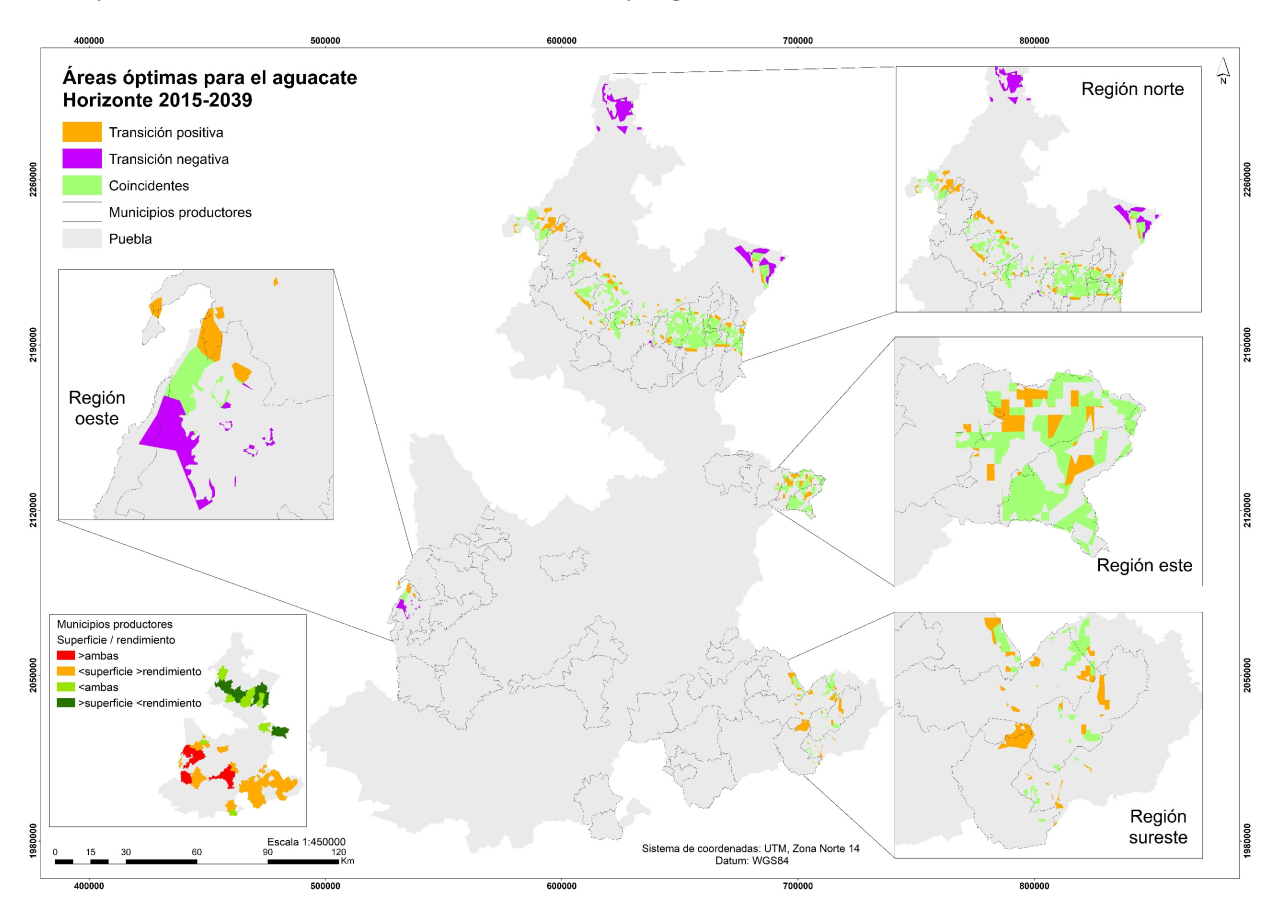


Figura 2. Aptitud edafoclimática óptima y sus variaciones para el aguacate en Puebla. Escenario RCP4.5 horizonte 2015-2039. Fuente: Elaborado por los autores.

Para el 2045-2069 el escenario muestra similitudes con el horizonte anterior (Figura 3). Por un lado, en la región norte se conservan gran parte de las áreas óptimas coincidentes entre ambos y la amplitud de la franja ocurriría más hacia el sur que al norte; prácticamente todos los polígonos de aptitud de la parte más septentrional transitarían a condiciones más bajas que las óptimas actuales. Mientras que en las regiones este y sureste las áreas de transición positiva favorecerían la conexión de las áreas óptimas actuales ya que se forman polígonos más grandes que podrían llegar a conectarse entre sí. En la región oeste sucede una situación parecida al 2015-2039, donde la amplitud de las zonas óptimas actuales se daría hacía el norte, pero con zonas de transición negativa al sur del polígono actual.

La posible explicación de las transiciones hacia condiciones óptimas traducidas en un aumento de la superficie bajo esa categoría denominadas aquí como áreas de transición positiva involucra, por un lado, la menor variación de la precipitación y temperatura mínima entre el escenario base y con cambio climático, reflejado en los valores de cambios porcentuales en estas áreas; estas variables fueron las de mayor ponderación para la zonificación. Por otra parte, debido a que las variables climáticas se ajustaron a una función de forma de campana; los valores que se encontraban en los límites para considerarlos como óptimos en la zonificación del escenario base, bajo los modelos de cambio climático les permitieron pasar de una condición media a óptima. La Tabla 4 ejemplifica lo antes dicho mediante los rangos de los valores de cambio en las áreas de transición positiva que fueron suficientes para cambiar de categoría.

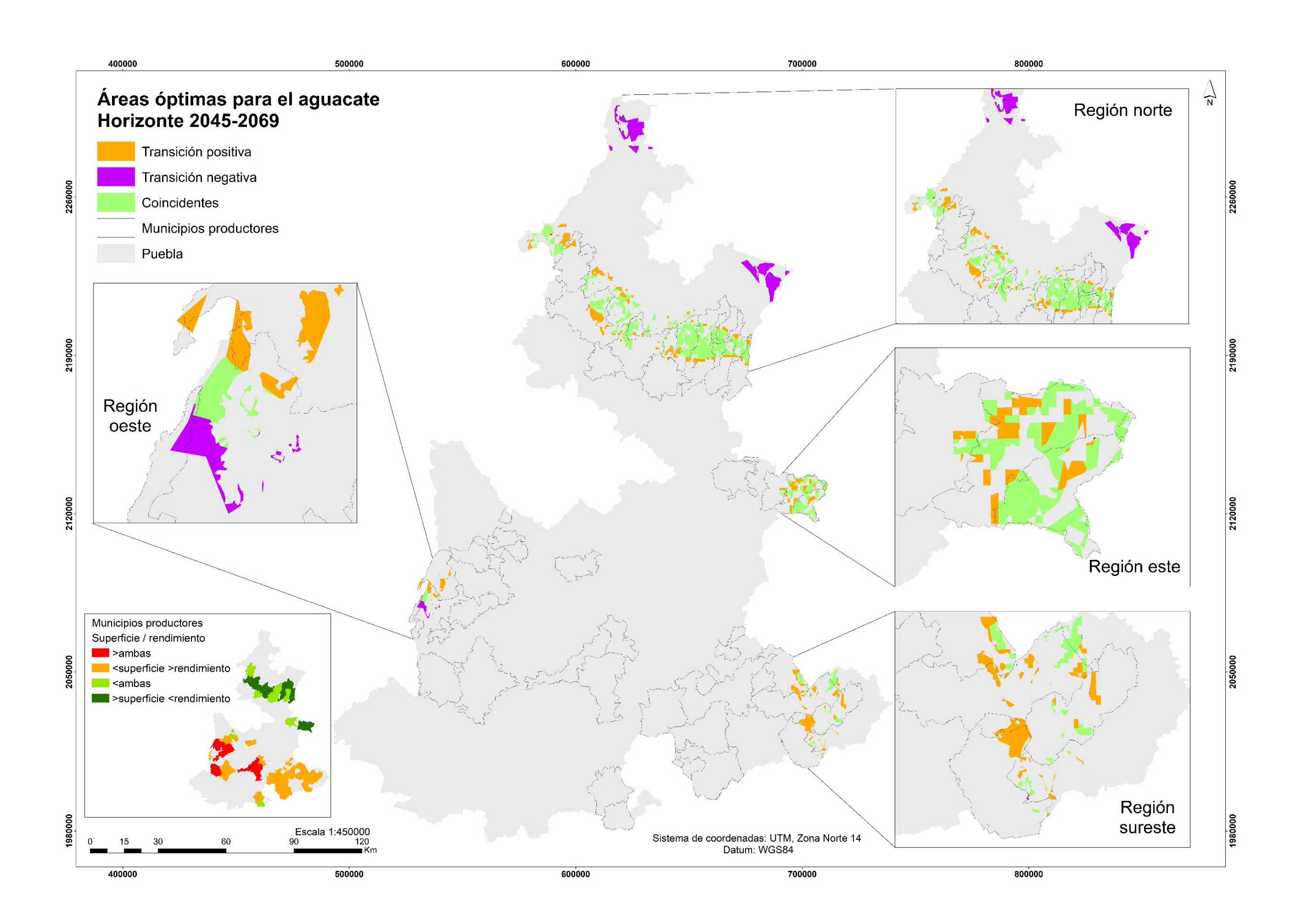


Figura 3. Aptitud edafoclimática óptima y sus variaciones para el aguacate en Puebla. Escenario RCP4.5 horizonte 2045-2069. Fuente: Elaborado por los autores.

Una situación para resaltar es la diferencia entre las áreas con las condiciones óptimas para las plantaciones y la relación entre la superficie sembrada y el rendimiento según los datos del SIAP (2022) tanto en el escenario base, como a medio y largo plazo, mostrados en las Figuras 2 y 3. En función de los resultados obtenidos, se muestran discrepancias entre los municipios donde la relación superficie/rendimiento está por encima de la media (localizados al oeste, centro, sur y sureste del estado) y las superficies con condiciones óptimas obtenidas mediante la zonificación, ya que son menos los polígonos que contienen dichas condiciones en el escenario base y a futuro, dicho de otro modo, es posible que la mayoría de las plantaciones en

estos municipios se encuentran actualmente en áreas con condiciones medias, y los altos rendimientos se deban a insumos agrícolas externos. El caso contrario sucede al norte y este de Puebla, donde se localizan gran parte de las áreas con condiciones óptimas actuales y potenciales en un futuro, pero los datos agrícolas en esos municipios señalan que los rendimientos se encuentran por debajo del promedio.

Tabla 4. Cambios porcentuales y diferencias absolutas de tres variables en las áreas de transición positiva.

2015-2039						
	Precipitación (%)		Temperatura mínima (Δ en °C)		Temperatura máxima (%)	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
CNRM	4,0	-13,0	0,7	0,4	9,0	0,4
GFDL	0,4	-15,0	1,4	1,1	13,0	4,0
HADGEM	4,0	-13,0	1,3	0,9	12,0	3,0
2045-2069						
	Precipitación (%)		Temperatura mínima (Δ en °C)		Temperatura máxima (%)	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
CNRM	-0,4	-15,0	1,5	1,1	13,0	3,0
GFDL	1,3	-14,0	2,5	2,0	19,0	9,0
HADGEM	6,0	-12,0	2,3	1,9	17,0	7,0

4. DISCUSIÓN

Los modelos de cambio climático tienen un nivel de confianza considerable, ya que son representaciones matemáticas del sistema climático que consideran las leyes físicas establecidas y cuentan con la capacidad para simular aspectos importantes del clima actual y del pasado, sin embargo, siguen teniendo limitaciones significativas (IPCC, 2013). Como mencionan Ortiz y Ortega (2015) "es importante reiterar que los escenarios de cambio climático a escala regional deben emplearse sólo como indicadores de sensibilidad del clima a cambios en el forzante radiativo, es decir, a incrementos en la concentración GEI y que los modelos del clima tienen diversas limitaciones para simular aspectos del clima". A pesar de lo dicho, son una buena herramienta para desarrollar escenarios de riesgo y dar respuesta a la cuestión ¿qué pasaría sí? Al respecto, Douglas y Wildavsky (1983) proporcionan una idea relevante al afirmar que "no podemos conocer el riesgo al que nos enfrentamos pero que deberíamos actuar como si lo supiéramos".

Entonces, teniendo en cuenta lo anterior, la zonificación que hemos realizado apunta a que las áreas con condiciones óptimas aumentarían. En un estudio llevado a cabo por Álvarez et al. (2017) en la región productora de aguacate en Michoacán donde emplearon una trayectoria de concentración representativa con un cambio radiativo fuerte (RCP8.5) a 2070, encontraron que los climas semicálidos húmedos tendrían las mejores condiciones para las plantaciones, sin embargo, la disminución de la precipitación, y especialmente, el incremento de la temperatura máxima promedio afectaría a la distribución de las plantaciones. En nuestro estudio también se presentan dichos incrementos de temperaturas, no obstante, la influencia asignada para las temperaturas máximas y mínimas fue distinta. En relación con esta idea, tanto el peso asignado a los criterios (variables) como los métodos de zonificación suelen variar; generalmente son abundantes aquellos que se basan en técnicas probabilísticas asociadas a ausencia y presencia de puntos georreferenciados como el utilizado por Charre et al. (2019). Otro aspecto importante es la inclusión de modelos de cambio de uso del suelo en las zonificaciones de cultivos. En nuestro caso, es probable que los componentes del mapa de restricciones utilizado como máscara evolucionen para esos horizontes de tiempo, lo que probablemente se traduzca en una disminución del área con condiciones óptimas. Por tanto, es necesario llevar a cabo investigaciones de estas variaciones en el área de estudio para combinarlos con los escenarios de cambio climático.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los Procesos Analíticos Jerárquicos permitieron asignar un valor operacional a los criterios que influyen en el aguacate. La asociación de los criterios mediante los ajustes a funciones de valores ayudó no solo a estandarizar los datos, sino a que estos estuvieran relacionados con el grado de aptitud. Como el problema planteado suponía la toma de decisiones espaciales fue inminente el empleo de Tecnologías de la Información Geográfica.

En esta investigación, el uso de los Sistemas de Información Geográfica no se restringió a la manipulación de grandes volúmenes de datos espaciales, sino que constituyeron una herramienta de análisis significativa sobre el estado existente; permitieron hacer proyecciones sobre lo que podría suceder y facilitaron la evaluación de los riesgos a asumir en el futuro en los espacios agrícolas y en la toma de decisiones sobre su ordenación territorial.

En cuanto a los resultados obtenidos, concluimos que la variabilidad de las precipitaciones y temperaturas por efecto de cambio climático repercutirán en la distribución de las áreas con condiciones óptimas para el aguacate en el estado de Puebla. Es posible que las áreas óptimas actuales sean más amplias por causa de las zonas de transición positiva en las 4 regiones identificadas. No obstante, al norte y oeste se localizarían la mayoría de las áreas de transición negativa donde las condiciones óptimas actuales serían menos favorables para el aguacate a medio y largo plazo.

Con el fin de fortalecer la toma de decisiones para la planificación agrícola en este territorio y para futuras investigaciones, recomendamos la creación de una base de datos georreferenciada para las plantaciones de aguacate en Puebla; la modelización con otros métodos de zonificación; la inclusión de modelos fenológicos, de cambio de uso del suelo a futuro y de proyección de la productividad y rendimiento; la inserción cartográfica de criterios de restricción para las plantaciones como eventos extremos, distribución de plagas y enfermedades; por último, la evaluación de la vulnerabilidad de los agricultores de aguacate.

6. BIBLIOGRAFÍA

Alcantar R., J. J. (2009). “Requerimientos agroecológicos”. En V. M. Coria A. (Ed.), *Tecnología para la producción de aguacate en México. Libro técnico. Núm. 8* (págs. 17-27). Uruapan, SAGARPA-INIFAP.

Alcantar R., J. J. y Muñoz F., H. J. (2012). “Factores limitantes climáticos y altitudinales”. En G. T. V. Chávez L., *Impacto del uso de suelo forestal a huertos de aguacate* (págs. 75-80). Uruapan, INIFAP.

Alvarado V., M. A., Foroughbakhch P., R., Jurado I., R. E. y Rocha, A. (2002). El cambio climático y la fenología de las plantas. *Ciencia UANL*, 5(4), 493-500.

Álvarez B, A., Salazar G., S., Ruíz C., J. A. y Medina G., G. (2017). Escenarios de cómo el cambio climático modificará las zonas productoras de aguacate Hass en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 8*(19), 4035-4048. https://doi.org/10.29312/remexca.v0i19.671.

Campos A., D. (2005). *Agroclimatología cuantitativa de cultivos*. México, Trillas.

Charre M., J. F., Mas, J. F. y Chang M., L. A. (2019). Áreas potenciales actuales y futuras de los cultivos de aguacate Hass en México utilizando el modelo Maxent en escenarios de cambio climático. *Revista UD y la Geomática* (14), 26-33. https://doi.org/10.14483/23448407.15659.

Chivasa, W., Mutanga, O. and Biradar, C. (2019). Mapping land suitability for maize (Zea may L.) production using GIS and AHP technique in Zimbabwe. *South African Journal of Geomatics, 8*(2), 265-281. 10.4314/sajg.v8i2.11.

Creative Decisions Foundation. (2020). *SuperDecisions V.3.2.* Obtenido de http://www.superdecisions.com/

Douglas, M. and Wildavsky, A. (1983). “Can We Know the Risk We Face?”. En M. a. Douglas, *Risk and Culture.* USA, University of California Press.

Fernández E., A., Zavala H., J., Romero C., R., Conde Á., A. C. y Trejo V., R. I. (2015). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica.* México, UNAM-INECC.

González H., A., Romero S., M. E., Pérez M., R., Zamora M., M.C., Islas T., B. y López E., A.G. (2017). *Potencial productivo para el establecimiento de Hevea brasiliensis (Willd. ex. A. Juss.) Müll. Arg. en el trópico húmedo mexicano.* México, INIFAP-CENID-COMEF.

Gutiérrez C., M., Lara C., Ma. B. N., Guillén A., H. y Chávez B., A. T. (2010). Agroecología de la franja aguacatera en Michoacán, México. *Interciencia, 35*(9), 647-653. ISSN 0378-1844

INEGI. (2005). *Conjunto de datos edafológicos. Escala 1:1 000 000 serie I.* México, INEGI.

INEGI. (2013). *Conjunto de Datos de Perfiles de Suelos, Escala 1:250 000. Serie II (Continuo Nacional*). México, INEGI.

INEGI. (2014). *Conjunto de Datos de Erosión del Suelo, Escala 1: 250 000 Serie I (Continuo Nacional).* México, INEGI.

INEGI. (2017a). *Anuario estadístico y geográfico Puebla 2017.* México, INEGI.

INEGI. (2017b). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI*. México, INEGI

IPCC. (2013). *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge University Press.

IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C. Sumary for Policymakers.* Switzerland, IPCC.

Moreno J., J. M., F. (2002). El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. *Rect@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 1-28.

ONU. (2022). *Objetivos de Desarrollo Sostenible. Objetivo 2. Poner fin al hambre*. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/

Ortiz P., C. F. y Ortega G., A. M. (2015). Agricultura y cambio climático en la región aguacatera del estado de Michoacán. *20º Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México* (págs. 1-29). Cuernavaca, AMECIDER–CRIM-UNAM. Obtenido de http://ru.iiec.unam.mx/2865/1/Eje3-168-Ortiz-Ortega.pdf

Romero S., M. A. (2012). *Comportamiento fisiológico del aguacate (Persea americana mill.) Variedad Lorena en la zona de Mariquita, Tolima.* Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.

Ruiz C., J. A. (2012). Adaptar la agricultura al cambio climático. *Ciencia*, 76-83. Obtenido de https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/63_4/PDF/Agricultura.pdf

Ruiz C., J. A., Medina G., G., González A., I. J., Flores L., H. E., Ramírez O., G., Ortiz T., C., Byerly M., K. F. y Martínez P., R. A. (2013). *Requerimientos Agroecológicos de Cultivos. Libro Técnico Número 3* (Segunda ed.). Guadalajara, INIFAP. Obtenido de http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/handle/123456789/4515

SEMARNAT-CONANP. (2017). Áreas Naturales Protegidas Federales de México. México, SEMARNAT-CONANP.

SIAP. (2022). *Datos abiertos. Estadística de la producción agrícola. Estadística de la producción agrícola 2003 a 2019.* Obtenido de Anuario Estadístico de la Producción Agrícola: http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos_a.php

Sotelo R., E. D., Cruz B., G. M., González H., A. y Moreno S., F. (2016). Determinación de la aptitud del terreno para maíz mediante análisis espacial multicriterio en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas,* *7*(2), 401-412. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000200401.

Torres L., P. A., Rodríguez S., L. M., Portes V., L. y Ramírez G., Carolina. (2009). "Cambio climático y procesos agroambientales en el desarrollo rural periurbano". En A. G. Aguilar, e I. Escamilla (Coords.), *Periferia urbana. Deterioro ambiental y reestructuración metropolitana* (págs. 197-221). México, UNAM-Porrúa.

UNIATMOS. (2014). *Repositorio Institucional. Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático* México, UNAM. https://ri.atmosfera.unam.mx:8150/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/search.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 391-400

Mejoras en el cálculo de los Modelos Digitales de Radiación Solar a partir del tratamiento del MDE y de la incorporación del patrón espaciotemporal de la profundidad óptica atmosférica: resultados preliminares para la Península Ibérica

C. Roca-Fernández[1], M. Ninyerola[2], X. Pons[1]

[1] Grumets Research Group, Departament de Geografia, Edifici B, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193, Catalonia, Spain
[2] Grumets Research Group, Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia, Edifici C, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193, Catalonia, Spain

Catalina.Roca@uab.cat, Miquel.Ninyerola@uab.cat, Xavier.Pons@uab.cat

RESUMEN: En este trabajo se presenta la metodología utilizada para el cálculo de un Modelo Digital de Radiación Solar (MDRS) de la Península Ibérica (PI) a 100 m de resolución espacial, el cual presenta dos novedades importantes respecto a trabajos previos: mayor precisión en la determinación de la geometría de iluminación, y aplicación de un modelo atmosférico no constante en el tiempo y el espacio, considerando los ángulos de incidencia del vector solar en cada instante a lo largo de los meses y años, las zonas con ocultamiento topográfico, las variaciones de la constante solar a lo largo del año debidas a la distancia Tierra-Sol, y el tipo de radiación solar. Para conseguir una mayor exactitud se ha utilizado un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a 100 m de resolución espacial desglosado en franjas latitudinales y teselas W-E, con tamaños y solapes calculados en sus 4 lados. Además, en el modelo actual se integra un modelo atmosférico basado en datos de profundidad óptica atmosférica debida a las nubes (COT, *Cloud Optical Thickness*) obtenida de teledetección satelitaria. Finalmente, para el ajuste y validación del nuevo MDRS se utilizarán como datos verdad-terreno los proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en sus estaciones meteorológicas.

Palabras-clave: modelo digital de radiación solar, geometría de iluminación, profundidad óptica atmosférica, modelo atmosférico.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este trabajo se presenta la metodología utilizada para el cálculo de un Modelo Digital de Radiación Solar (MDRS) de la Península Ibérica (PI) a 100 m de resolución espacial, el cual presenta dos novedades importantes respecto a trabajos previos: mayor precisión en la determinación de la geometría de iluminación, y la integración de observaciones de teledetección para la aplicación de un modelo atmosférico no constante en el tiempo y el espacio.

En efecto, en aproximaciones anteriores se consideraba una posición solar simplificada considerando un único punto central para toda la PI en el cálculo de la radiación solar, y una densidad óptica atmosférica constante a lo largo del día y del año y estándar para días claros (Pons, 1996; Pons y Ninyerola, 2008; Ruiz-Arias et al., 2011; Zhang et al., 2015), mientras que, para un cálculo más preciso de la radiación solar que permita obtener resultados espacializados para toda la PI y a lo largo del tiempo mediante la integración de distintos modelos atmosféricos, la nueva propuesta se basa en los objetivos siguientes:

- *Mejorar la geometría de iluminación solar a partir de la teselación adecuada con su zona de influencia (buffer) calculada en sus 4 lados para considerar los obstáculos topográficos en la radiación solar.* El modelo actual considera los ángulos de incidencia del vector solar en cada instante a lo largo de los meses y años, las zonas con ocultamiento topográfico, las variaciones de la constante solar a lo largo del año debidas a la distancia Tierra-Sol, y el tipo de radiación solar (directa y/o difusa). Para una mayor exactitud se ha utilizado un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a 100 m de resolución espacial desglosado en franjas latitudinales y teselas W-E, con tamaños y solapes calculados en sus 4 lados. Ello ha permitido asumir como negligibles (<= 1.00 %) las diferencias en la posición solar entre teselas y, al mismo tiempo, asegurar que se consideran correctamente las sombras orográficas proyectadas sobre teselas vecinas en

cada punto.

- *Calcular mejor la situación atmosférica a partir de datos de profundidad óptica atmosférica debida a las nubes (Cloud Optical Thickness, COT), reflejando más rigurosamente la variabilidad espaciotemporal de la PI.* El modelo atmosférico se basa en la integración de datos de COT obtenidos mediante teledetección satelitaria. La COT es la principal responsable de la extinción atmosférica de la radiación solar a través de su influencia sobre la transmitancia descendente (τ_1). Gracias a la teledetección (como por ejemplo los productos utilizados en este trabajo: CLAAS 2.1 derivados del sensor SEVIRI de los satélites MSG durante el período temporal diurno mensual horario 2004–2017) se obtienen valores de COT diferentes según las zonas de la PI en cada momento, lo cual revierte en un cálculo de un MDRS mucho más ajustado a la variabilidad espaciotemporal de la radiación solar que alcanza la superficie de la Tierra.

Finalmente, para el ajuste y validación del nuevo MDRS se utilizarán como datos verdad-terreno los proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en sus estaciones meteorológicas para el período temporal diario 1980–2020. Consideramos que este nuevo MDRS aportará una base de gran interés en estudios de modelización climática general, así como en aspectos particulares como el estudio de las sequías.

2. CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS Y RESULTADOS PROVISIONALES

A partir de los objetivos anteriores, en este apartado se expone el estado actual de esta investigación, explicando y discutiendo los aspectos metodológicos que se han ido desarrollando.

Con la herramienta InsolDia, desarrollada en el entorno SIG MiraMon (MM) se ha hecho una primera aproximación al cálculo de la radiación solar (10 kJ/(m^2*día)) (Figura 2). Para ello se ha utilizado un MDE a 100 m de resolución espacial, obtenido a partir del MDE PNOA <Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (ign.es)> para los territorios españoles, y del MDE de ASTER v. 3 <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> para los territorios portugueses. La zona pirenaica contiene los datos del MDE PNOA para el territorio francés donde existen, así como los datos del MDE de las colecciones preferidas del MM para el territorio andorrano. Las hojas del MDE PNOA se han mosaicado mediante cambio de lado de píxel de un ráster de 5 m a 50 m, utilizando como criterio de contracción la mediana, y finalmente se ha aplicado un remuestreo por interpolación bilineal de 50 m a 100 m. Para las hojas del MDE de ASTER, estas se han mosaicado mediante remuestreo por interpolación bilineal de 30 m a 100 m. Siguiendo los mismos criterios de mosaicado, se han utilizado las imágenes del MDE PNOA para las Islas Baleares y las imágenes del MDE de ASTER más allá de la frontera pirenaica catalana con Francia, haciendo convergir todos los sistemas de referencia a UTM-30N ETRS89. Se ha comprobado que en la frontera con Portugal la diferencia entre los valores de los MDE es suficientemente pequeña, obteniendo los siguientes valores: media = 0.01 m; desviación estándar = 6.31 m; mínimo = -59.39 m; máximo = 53.20 m; diferencias > +10 m = 4.60 %; diferencias < -10 m = 5.50 %. Se ha añadido una zona de influencia de costa de 2 km con valor 0 para evitar artefactos en los cálculos, por ejemplo, de radiación solar; todo lo que está más allá de esta zona de influencia se ha asignado como NoData. Finalmente, a través de la aplicación de *Google Maps* se han comprobado las zonas <= -30 m, observando que se tratan de zonas de extracción minera.

InsolDia es una herramienta que calcula la radiación solar total (directa y difusa, sin considerar la reflejada por su habitualmente discreta aportación) que llega a la superficie de la Tierra. También tiene en cuenta información sobre la estructura del relieve, ya que integra las pendientes, las orientaciones y las sombras proyectadas por el mismo. Dado que la variabilidad interanual de la irradiancia solar es muy baja, no se contemplan en este estudio los datos a lo largo de los años (sí las diferencias Tierra-Sol). En cambio, sí que se desea calcular la radiación solar individualizada para todos los meses del año ya que sí que es claramente diferente (cambios en la altura solar y la ya referida distancia Tierra-Sol). En cada mes se ha considerado suficiente realizar el cálculo a día 15, y en ese día integrar toda la radiación que llega desde el alba hasta el ocaso, ya que el día central del mes es suficientemente representativo del promedio diario mensual. Sin embargo, la situación atmosférica es cambiante a lo largo del día y de los meses del año, lo cual se introducirá como novedad en el modelo. Los parámetros adicionales a los ya expuestos son los siguientes:

- *Modelo Digital de Sombras:* Se calcula previamente para un rango de azimuts entre 30° y 330° (dada la latitud de la PI), con saltos de 5° en 5°, a partir del MDE. Se utiliza este rango para que el resultado sea simétrico y porque en algunas zonas de la PI puede ser que el Sol salga o se ponga más hacia el N de los ± 50°, sobre todo hacia el solsticio de verano. Los modelos de sombra resultantes contendrán los ángulos de elevación solar por debajo de los cuales se producen sombras en cada punto para todo el rango de los posibles ángulos azimutales que se darán durante el día escogido.

- *Irradiancia exoatmosférica:* Se utilizará la constante solar de 1366 W/m^2 (ISO 21348:2007) en el momento medio de las distancias astronómicas Tierra-Sol (1 unidad astronómica, AU). InsolDia considera los cambios de la constante solar en función del día del año a partir del cálculo astronómico de dichas distancias, de manera que la proporción con el valor medio (1 AU) resulta en un coeficiente que modula la constante solar entre ± 3.40 %. En el momento de la órbita (momento del año) en el que la Tierra esté a la distancia media del Sol, el coeficiente modulador será 1 y la constante solar de 1366 W/m^2, mientras que en el perihelio el coeficiente será máximo y en el afelio mínimo.
- *Coeficiente de extinción atmosférica de la energía solar (τ_0):* Permite tener en cuenta tanto la dispersión como la absorción de la radiación. Anteriormente (Pons y Ninyerola, 2008) se había utilizado un valor promedio de 0.288 para un día claro en el conjunto del espectro solar (propuesto por Rothermel et al. (1986), para una atmósfera clara forestal media). En esta nueva primera aproximación de la radiación solar (Figura 2), este valor es, pues, constante. Una de las principales novedades en la aproximación en la que se integra este trabajo, consiste en considerar τ_0 diferentes según las zonas de la PI, necesitando para ello integrar imágenes de teledetección que proporcionen la COT (τ_0 relacionada con la nubosidad) en cada punto y momento. Es precisamente este cálculo de la COT, el segundo de los objetivos de esta contribución, necesario para poder aplicarla en una segunda aproximación de cálculo del MDRS.
- *Incremento horario:* Establecido en 0.5 h, se trata del incremento en unidades horarias que se aplica a cada posición solar desde la salida del Sol hasta la puesta.

En esta primera aproximación del nuevo MDRS (Figura 2) se ha puesto en práctica la metodología para mejorar la geometría de iluminación solar, tratándose del primer objetivo de esta contribución. Dicha mejora se basa en los siguientes criterios:

- *Tamaño de tesela negligible en cuanto a posición solar en cualquiera de sus puntos.* InsolDia debe poder calcular la radiación solar a partir del punto central de cada tesela con la confianza que ésta es suficientemente pequeña (aunque no tendría sentido hacer el cálculo a 100 m para un ámbito tan grande como la PI), para que las diferencias de posición solar en el punto central de la misma y cualquier punto de la tesela sean mínimas. Ello se ha calculado mediante los procedimientos astronómicos pertinentes que han llevado a desglosar el MDE en franjas latitudinales y teselas W-E, con los tamaños que se indicarán.
- *Solape suficiente entre teselas para asegurar una correcta consideración del ocultamiento topográfico.* Como es sabido, la radiación solar cambia a lo largo del año también por la altura solar. En efecto, en la PI es máxima en junio y mínima en diciembre y a la vez también aumenta conforme nos desplazamos desde el N hacia el S, produciéndose menos zonas con ocultamiento topográfico. Para tener correctamente en cuenta este efecto, debe disponerse de una zona de influencia suficiente en cada zona, pero no excesiva para no ralentizar innecesariamente el cálculo. Para ello el teselado del MDE deducido de las necesidades del punto anterior, debe ampliarse con solapes calculados en sus 4 lados para tener en cuenta el ocultamiento topográfico que se pueda crear como consecuencia de las sombras orográficas generadas sobre aquella tesela. Dicho de otra manera, cada tesela dispone de una zona de influencia suficiente para asegurar que cualquier obstáculo topográfico a la radiación será tenido en cuenta y en esos puntos el programa aplicará exclusivamente un modelo de radiación difusa. Posteriormente MM realizará el mosaico de todas las teselas excluyendo las zonas de influencia que ya no son necesarias (y conllevarían problemas si se incluyeran en el mosaico).

La conjunción de ambos criterios ha llevado, pues, a la determinación del tamaño de las teselas y sus zonas de solape en las que se ha dividido la PI. Fruto de los cálculos realizados se prevén errores sistemáticos mínimos debidos a la posición solar entre teselas y al ocultamiento topográfico de teselas vecinas. En efecto, se ha ajustado el método definiendo estos errores en diferencias relativas de radiación solar en la precisión del cálculo que, en cualquier caso, son menores o iguales a 1.00 %. Se han realizado comprobaciones adicionales para asegurar dicha precisión:

- Las franjas latitudinales se comprobaron a partir de las diferencias de radiación solar en zonas de mar entre franjas vecinas (N-S) a 2 km de la costa porque en estas localizaciones la radiación solar es constante, ya que el mar es una superficie uniforme, sin obstáculos topográficos y sin sombras. También se hicieron comprobaciones entre 2 puntos cercanos sobre el territorio, repitiendo el proceso en 2 puntos especialmente distintos: 2 puntos en Galicia, y 2 puntos en Cádiz. Para ello se definió un ámbito libre de obstáculos topográficos de 3 x 3 celdas de 100 m de lado para el cálculo de las sombras que se utilizarán en la radiación solar. Además, se trabajó en este caso en incrementos de posición en azimut de 1° para aumentar la precisión del cálculo. De esta forma, y sin considerar posibles zonas de solape se garantiza que la similitud de radiación solar será por debajo del límite preestablecido. Los resultados obtenidos para las franjas

latitudinales de 10 km (Figura 1) han sido los siguientes:

- Diferencias de radiación solar en 2 puntos de Galicia (coordenada Y de los puntos, en UTM-30N ETRS89: 4861150 y 4851150): 1.00 % entre los 2 puntos.
- Diferencias de radiación solar en 2 puntos de Cádiz (coordenada Y de los puntos, en UTM-30N ETRS89: 3979750 y 3989750): 0.60 % entre los 2 puntos.

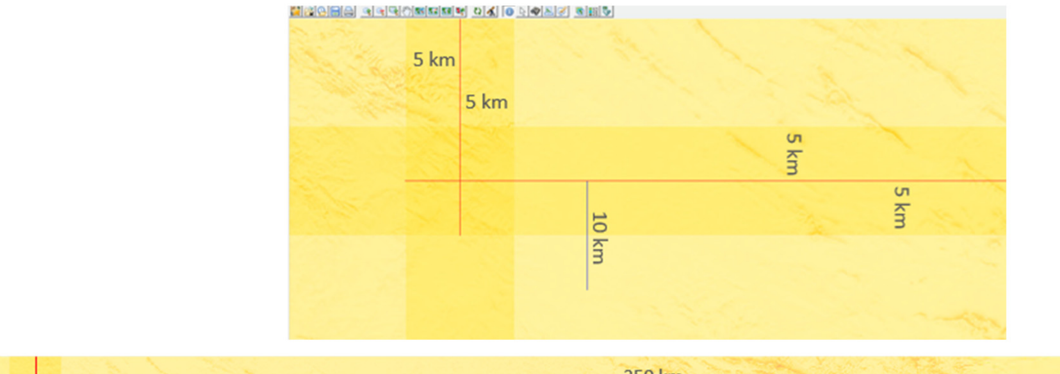




Figura 1. Ejemplo de teselas: 10 km latitudinales x 250 km longitudinales + 5 km de solape en las cuatro direcciones. Modelización de la radiación solar a 15 de junio de 1985.

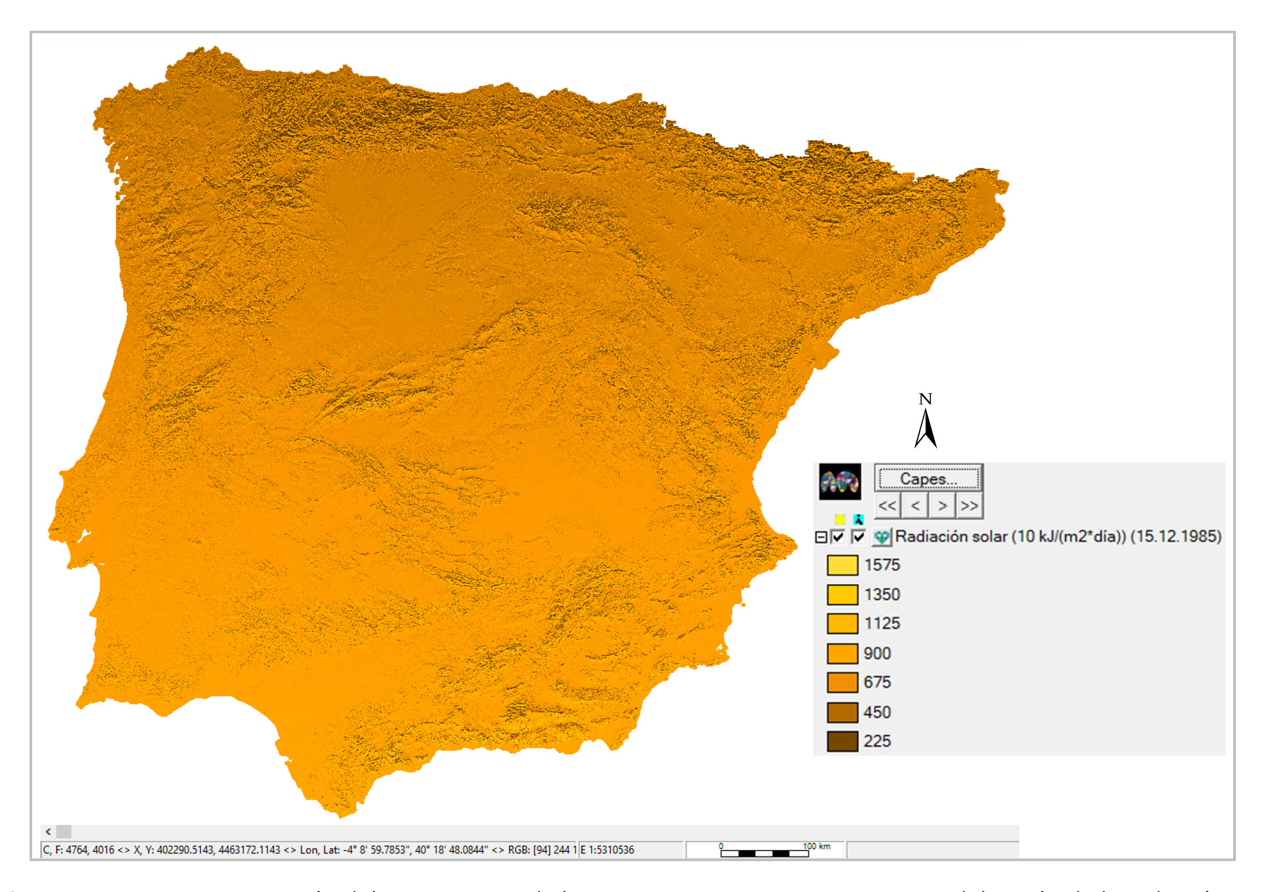


Figura 2. Primera aproximación del nuevo MDRS de la PI a 100 m. UTM-30N ETRS89. Modelización de la radiación solar a 15 de diciembre de 1985, basada en la teselación.

- Las teselas W-E se comprobaron a partir de las diferencias de radiación solar entre 3 puntos concretos sobre el territorio (Finisterre – Meridiano Central de la PI – Cap de Creus), definiendo un ámbito libre de obstáculos topográficos como en el caso anterior. Los resultados obtenidos para las teselas W-E de 250 km (Figura 1) han sido los siguientes:
    - Diferencias de radiación solar inferiores al 1.00 % entre todos los 2 puntos.
- Para determinar la consideración del ocultamiento topográfico se generaron perfiles de radiación solar de forma horizontal en los solapes de la zona N, medial y S, y perfiles de forma vertical en la zona W, medial y E. En este caso sí que se trazaron sobre el MDE y, por tanto, se consideraron las sombras topográficas calculadas cada 5° para el rango azimutal 30° a 330° (en este caso no se consideraron las zonas de mar situadas en los solapes). Los resultados obtenidos han sido los siguientes para solapes de 5 km en los 4 lados de la tesela en franjas latitudinales de 10 km y longitudinales de 250 km (Figura 1):
    - En el solape latitudinal la diferencia media fue de 0.29 % en zonas menos abruptas y de -0.15 % en zonas más abruptas, y en el solape longitudinal la diferencia media fue de 0.16 % en zonas menos abruptas y de -0.98 % en zonas más abruptas.
    - Teniendo en cuenta la estacionalidad de los datos de radiación solar (enero, abril, junio y octubre), se detectaron, como era de esperar, más diferencias de radiación solar durante el invierno porque el Sol está más bajo y las sombras topográficas proyectadas generadas por la orografía de una tesela a la tesela vecina son más grandes. En ningún caso, sin embargo, estas diferencias fueron superiores al 1.00 %.

Actualmente, a partir de la introducción de datos de COT mediante imágenes de teledetección satelitaria se está desarrollando una segunda aproximación mejorada del MDRS. Se han hecho diversas pruebas, utilizando datos de COT que ofrecen los diferentes sensores:

- *MODIS (a bordo de los satélites Terra y Aqua):* Los productos que se han utilizado son MOD06_L2 (Terra) y MYD06_L2 (Aqua), disponibles en su web <MODIS Web (nasa.gov)>. El producto MOD06_L2 ofrece datos de COT diarios para el período temporal 2000–2021, con una resolución temporal entre las 10 h y las 12 h, y una resolución espacial de 1 km. El producto MYD06_L2 ofrece datos de COT diarios para el período temporal 2002–2021, con una resolución temporal entre las 13 h y las 15 h, y una resolución espacial de 1 km.
- *AVHRR Pathfinder PATMOS-x (a bordo de los satélites NOAA):* Este producto, disponible en la web de GEWEX Cloud Assessment Database <GEWEX Cloud Assessment (polytechnique.fr)>, ofrece datos de COT medios mensuales para el período 1982–2009, con una resolución temporal que es la media mensual a las 13:30 h, y una resolución espacial de 1°.
- *SEVIRI (a bordo de los satélites MSG):* Se ha utilizado la familia de productos CLAAS 2.1, disponibles en la web de la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT) <EUMETSAT - Product Navigator - CLAAS-2.1: CM SAF Cloud Property Dataset using SEVIRI - Edition 2.1>. Se ofrece un subproducto de COT instantáneo a partir del producto CPP (*Cloud Physical Properties*), a una resolución temporal de 15 minutos, y a 0.05° de resolución espacial. Para obtener la COT con otra resolución temporal (diaria, mensual o diurna mensual horaria a lo largo de todo el día, siendo estos datos la media calculada a partir de los instantáneos cada 15 minutos (Benas et al., 2017)), ofrecen una serie de productos y de subproductos a diferentes escalas de resolución espacial (0.05° para los productos diario y mensual, y 0.25° para el producto diurno mensual horario) para que, al aplicar la Ecuación (1) pueda obtenerse la COT y derivar el modelo atmosférico necesario. Nótese que se deberá aplicar el factor de escala a cada subproducto por separado antes de aplicar la Ecuación (1).

$$COT = cot_{liq} * cph + cot_{ice} * (1 - cph) \quad (1)$$

Donde:

cot_{liq} es un subproducto del producto LWP (*Liquid Water Path*) que consiste en la media instantánea cada 15 minutos de la COT de agua líquida contenida en la nube. Deberá multiplicarse el valor de cada píxel por el factor 0.01, ya que los valores de cot_{liq} están escalados entre 0 y 100.

cph es un subproducto del producto CPH (*Cloud Phase*) que consiste en la media instantánea cada 15 minutos de la fracción de agua líquida contenida en la nube. Deberá multiplicarse el valor de cada píxel por el factor 0.01, ya que los valores de cph están escalados entre 0 y 1. Esta variable, al indicar la fracción de nubes de agua, multiplica la componente de cot_{ice} por el complementario a 1 de la misma variable.

cot_{ice} es un subproducto del producto IWP (*Ice Water Path*) que consiste en la media instantánea cada 15 minutos de la COT de agua sólida (hielo) contenida en la nube. Deberá multiplicarse el valor de cada píxel por el factor 0.01, ya que los valores de cot_{ice} están escalados entre 0 y 100.

El período temporal de los productos que ofrece SEVIRI es 2004–2017, y los aspectos técnicos más relevantes son los siguientes (EUMETSAT Data Services, 2022b):

- El principio central del método para recuperar las propiedades físicas de las nubes es que la reflectividad de las mismas a una longitud de onda de no-absorción (0.6 o 0.8 µm) está fuertemente relacionada con la densidad óptica y tiene poca dependencia con el radio efectivo de las partículas, mientras que la reflectividad de las nubes a una longitud de onda de absorción (1.6 o 3.7 µm) depende en gran medida del radio efectivo de las partículas (Nakajima y King, 1992, dentro de EUMETSAT Data Services, 2022b).
- Se utiliza el algoritmo CPP v. 3.9 (Roebeling et al., 2006, dentro de EUMETSAT Data Services, 2022b) y el modelo de transferencia radiativa Doubling-Adding KNMI (DAK) (De Haan et al., 1987, dentro de EUMETSAT Data Services, 2022b; Stammes, 2001, dentro de EUMETSAT Data Services, 2022b). Se simulan reflectividades de longitudes de onda de 0.6 y 1.6 µm en la *Top of Atmosphere* (TOA) en función de la geometría de visualización, la densidad óptica de la nube, el radio efectivo de las partículas y la fase de la nube. Estas reflectividades simuladas se almacenan en una tabla *Look Up Table* (LUT). Se comparan simultáneamente las reflectividades observadas por el satélite con la LUT de reflectividades simuladas. Se realiza un proceso iterativo que finaliza cuando la densidad óptica de la nube recuperada converge a un valor estable.
- Sobre superficies muy brillantes, especialmente en hielo y nieve, la recuperación de las propiedades de las nubes es muy problemática, porqué las reflectividades en los canales del visible son muy similares entre estas superficies. Además, la recuperación de las nubes "rotas" se ve afectada por la contribución de la reflectividad de la superficie, lo que, en general, da lugar a una subestimación de la COT en los píxeles parcialmente nublados.
- Para los píxeles NoData, los productos IWP y LWP únicamente están disponibles para las horas diurnas, ya que es necesaria la radiación solar para que el sensor pueda registrar datos de reflectividad y obtener la cot_{ice} y la cot_{liq}, respectivamente. Por tanto, según la latitud y longitud, en las horas límite del ciclo diurno siempre se encontrarán píxeles NoData en las esquinas de las imágenes de la COT obtenidas (Figura 3). Además, existen otros tipos de píxeles NoData, los debidos a píxeles corrompidos o sin nube, aunque el número de franjas horarias con este tipo de NoData es pequeño.

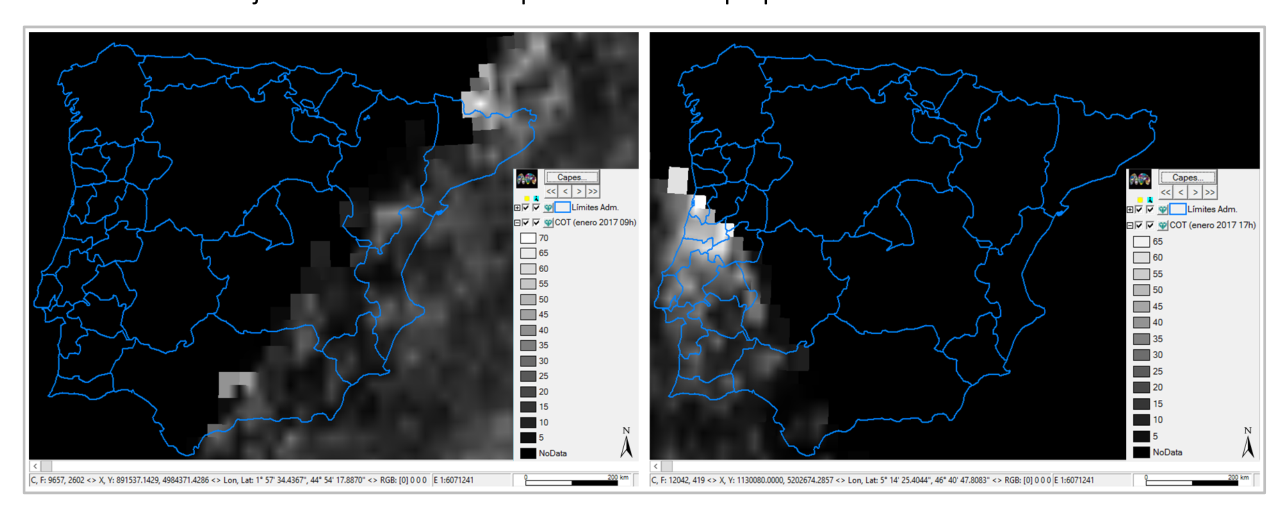


Figura 3. COT diurno mensual horario de la PI obtenido a partir de la Ecuación (1), remuestrado a 100 m. UTM-30N ETRS89 (a la izquierda COT a enero 2017 a las 09 h, y a la derecha COT a enero 2017 a las 17 h). Se aprecia tanto la falta de datos en las horas límite de esta fecha solsticial, así como la presencia de artefactos (que serán tratados debidamente) entre la presencia y la ausencia de datos.

- Se utilizó SEVIRI-MSG1 para el período enero 2004 – abril 2007, SEVIRI-MSG2 para el período abril 2007 – enero 2013, y SEVIRI-MSG3 para el período enero 2013 – diciembre 2017. En este contexto, se produjeron lagunas significativas sin datos durante el servicio operacional de Meteosat-8 en agosto del 2005 y enero del 2006, en ambos meses inferiores a 2 días, y entre septiembre – octubre del año 2006, para el que

existe un vacío de 2 semanas (Stengel et al., 2014). Se rellenaron los *gaps* de las series temporales utilizando datos de *backup* del satélite, en caso de que estuviesen disponibles.

- Se procesaron secuencialmente todos los intervalos de tiempo de un mismo día. El procesado empezaba a medianoche. Esto permitió la detección de nubes temporales para todos los intervalos de tiempo, excepto a las 00:00 h (Derrien y LeGleau, 2010, dentro de EUMETSAT Data Services, 2022b). Se procesaron hasta 90 días en paralelo aislados entre sí para generar el registro de los datos.
- Las series temporales de las reflectividades de SEVIRI se calibraron a partir de las de MODIS ya que MODIS ha demostrado ser un producto estable a lo largo del tiempo y ha estado en órbita durante el período de tiempo completo del MSG.
- En el caso de los productos con resolución temporal diurna mensual horaria a lo largo del día, éstos se prepararon a una resolución espacial menos detallada (0.25°) en relación con los productos instantáneos, diarios y mensuales (0.05°) con la finalidad de conservar un número suficiente de observaciones en cada píxel (Benas et al., 2017).

En base al análisis visual, al cálculo de las diferencias entre los datos y a algunas comparaciones con imágenes Landsat descargadas del SatCat <SatCat: Servidor d'imatges de satèl·lit de Catalunya (grumets.cat)>, además de la información buscada, se determina utilizar los productos derivados de SEVIRI para obtener la COT y generar el modelo atmosférico de la PI, ya que SEVIRI ofrece una τ_0 más representativa que los otros sensores debido a que proporciona una radiografía temporal (a lo largo del día) más densa de los datos, mientras que MODIS proporciona una COT un poco más elevada a lo largo de todos los años de la serie ajustada, y SEVIRI detecta, en general, nubes más finas que MODIS para todo el mes (EUMETSAT Data Services, 2022b).

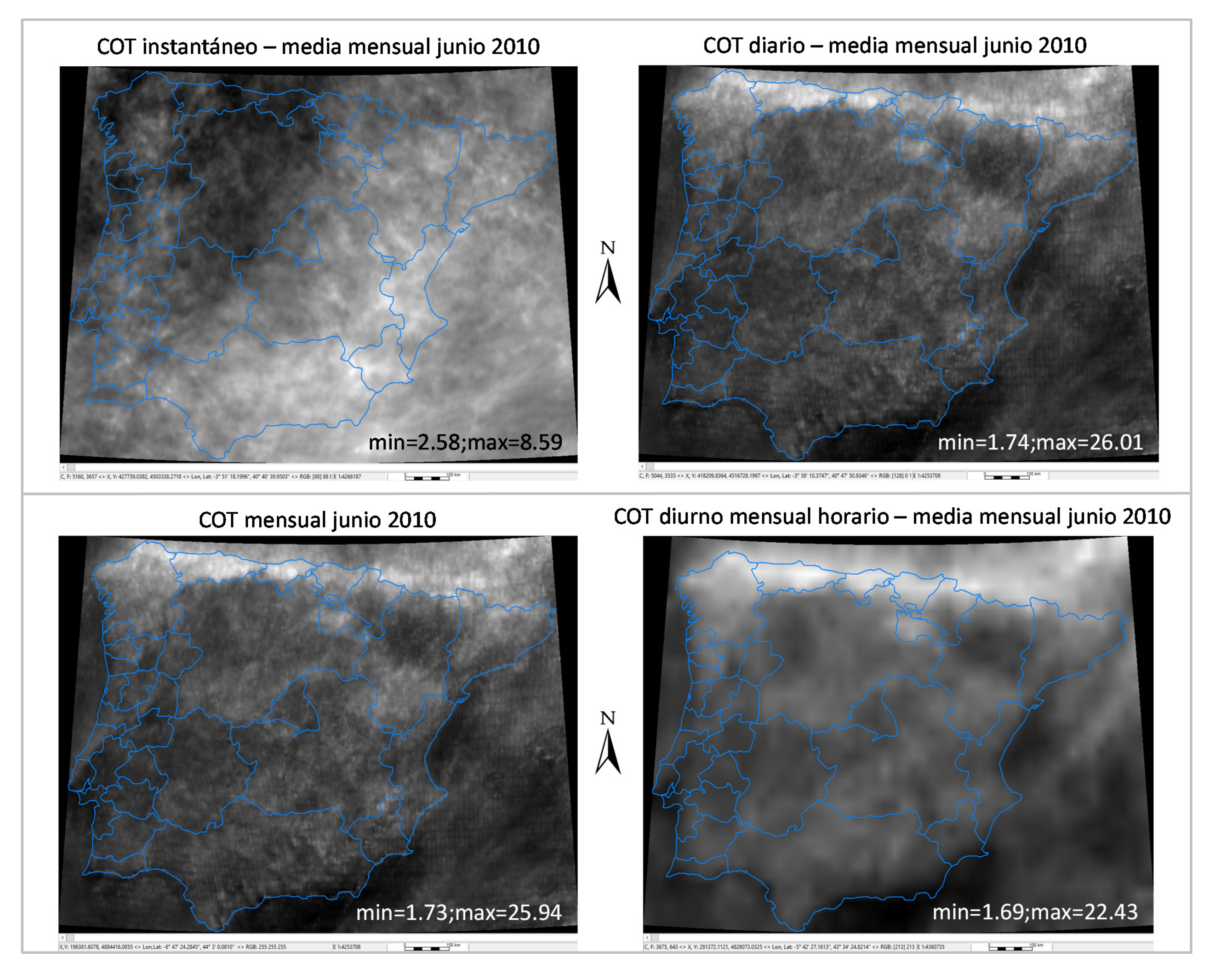


Figura 4. COT a las diferentes resoluciones temporales de la PI obtenidas a partir de la Ecuación (1), excepto el producto instantáneo (calculado en origen), remuestradas a 100 m. UTM-30N ETRS89. COT a junio 2010.

Para decidir la representatividad temporal a utilizar se han contrastado todas las resoluciones temporales posibles que ofrece SEVIRI (instantánea, diaria, mensual y diurna mensual horaria), determinando que:

- Como nuestro interés es calcular la radiación solar mensual anual horaria (media en una cierta hora, calculada a partir de todos los datos de aquel mes y año), o bien mensual climática horaria (media en una cierta hora y mes, calculada a partir de todos los datos de todos los años), se han descartado los productos instantáneos y diarios de SEVIRI. De todos modos, éstos se han comparado entre ellos y con los productos mensuales, además de con imágenes Landsat descargadas del SatCat (para las horas equivalentes), obteniendo diferencias significativas en el patrón geográfico y en las magnitudes de la COT del producto instantáneo que no comprendemos, más aún cuando los otros 3 productos son claramente coherentes (Figura 4).
- La elección entre los productos mensual (0.05°) y diurno mensual horario (0.25°) conlleva que con el segundo se pierde resolución espacial, pero se gana en resolución temporal ya que se puede obtener la COT con la Ecuación (1) de cada hora a lo largo del día. Esto permite integrar, para el mismo período temporal de la COT (2004–2017), el modelo atmosférico al cálculo de la radiación solar de la PI en horas concretas, y obtener el MDRS con carácter mensual anual horario, además del MDRS con carácter mensual climático horario. Asimismo, se ha realizado una comparación entre los modelos de diferente resolución con la herramienta AdapRas de MM, que permite adaptar un ráster según el patrón geométrico de un segundo ráster, comprobando que entre ambos productos existen buenas similitudes geográficas y de magnitudes de la COT. En efecto, las diferencias entre las medias son muy próximas a 0, a la vez que las magnitudes del coeficiente de correlación r de Pearson son de 0.95 para todo el modelo peninsular y de 0.79 cuando tomamos perfiles concretos de la COT a lo largo de zonas en las direcciones N, S, W y E de la PI, y en 2 diagonales (NE-SW y NW-SE).

Es necesario tener en cuenta que la COT no considera los aerosoles, y que la profundidad óptica atmosférica puede ser debida a las nubes (COT) o a los aerosoles, en cuyo caso viene determinada por el parámetro *Aerosol Optical Thickness* (AOT). La profundidad óptica atmosférica da cuenta de la extinción de la radiación solar producida por procesos de absorción y/o dispersión atmosférica. Dichos procesos afectan a la transmitancia de manera diferente en función de la longitud de onda, siendo τ_1 la transmitancia descendente y τ_2 la transmitancia ascendente (necesaria en correcciones radiométricas de instrumentos de teledetección que miden radiación reflejada).

Se ha hecho una pequeña investigación sobre si fuese conveniente combinar datos de COT y de AOT para estimar mejor la radiación solar, y se concluye lo siguiente (Yolanda Sola y Jeroni Lorente de Física de la Atmósfera del Departamento de Física Aplicada de la UB, comunicación personal, 25 de marzo del 2021):

- Para análisis de la atmósfera, como por ejemplo estudios sobre la calidad del aire, mejor utilizar la AOT como la extinción de la radiación solar integrada en la columna atmosférica. Pero para estimar con más precisión la radiación solar, mejor utilizar datos de COT como la extinción de la radiación solar integrada en la columna atmosférica.
- Las nubes tienen más peso en la radiación solar que llega a la superficie que no los aerosoles. Además, los aerosoles no se detectan bien cuando hay nubes densas, y si no se complementa con algún perfilador (lidar) no se puede afinar bien para separar los dos componentes.
- Los datos de COT y de AOT pueden corresponder a momentos diferentes del día. Por tanto, los datos son difícilmente combinables.
- Cuando son coincidentes en el tiempo tampoco serían combinables ni comparables, porque las magnitudes son tan diferentes que deberían ser por ejemplo tormentas de arena en AOT para ser comparables con datos de COT.
- Normalmente los aerosoles residen por debajo o dentro de la nube, y su densidad óptica es pequeña en comparación con la de la nube. Pero si los aerosoles residen por encima de la nube y si absorben suficiente energía, pueden reducir significativamente la reflectividad en el visible y entonces se estaría subestimando la COT (EUMETSAT Data Services, 2022a, 2022b).
- Son datos que provienen de componentes atmosféricos diferentes y se miden en longitudes de onda diferentes (COT entre 0.6 – 3.7 µm, principalmente sobre la columna de la nube, y AOT en 0.55 µm sobre toda la columna atmosférica).

3. CONCLUSIONES Y CONTINUIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

Los avances realizados permiten disponer de un modelo de teselación que reduce a menos de un 1.00 % los problemas que pudieran derivarse de la distinta posición solar en cada punto de la PI, sin incurrir en errores por no consideración del ocultamiento topográfico en cada punto. Por otra parte, los avances también han logrado definir un modelo atmosférico de la COT para la PI que permitirá ir más allá de las aproximaciones previas del MDRS (Pons y Ninyerola, 2008), que consideraban una atmósfera clara y constante a lo largo del día y del año, y representar mejor la variabilidad espaciotemporal de la radiación solar en este territorio (a partir de los modelos atmosféricos mensuales horarios (anual y climático) en cada punto). Para ello se han utilizado productos CLAAS 2.1 del sensor SEVIRI de los satélites MSG durante el período temporal 2004–2017.

Esta metodología permitirá generar diferentes MDRS a partir de la integración de distintos modelos atmosféricos de la COT, ajustados a la variabilidad espaciotemporal de la PI, calibrados y validados con los datos verdad-terreno para el período temporal diario 1980–2020 de las estaciones meteorológicas de la AEMET. Los resultados se espera que sean de gran interés en estudios de distribución de la vegetación y en modelización climática general, y en particular para el estudio de las sequías, mejorando el cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP), variable incluida en el índice de sequía climática SPEI.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se está llevando a cabo en el marco de la contratación de personal investigador predoctoral en formación FI-DGR (2020FI-B00669), cofinanciada por la Agencia de Gestión de Ayudas Universitarias y de Investigación (AGAUR) de la Generalitat de Catalunya y por la Unión Europea (UE), a través del Fondo Social Europeo (FSE). Forma parte del proyecto de investigación I+D+i NEWFORLAND (RTI2018-099397-B-C21), desarrollado por el grupo de investigación GRUMETS.

Se agradece al Sr. Martin Stengel de EUMETSAT la facilitación de los detalles específicos de los productos de EUMETSAT, además de indicarnos que únicamente hiciésemos uso de la familia de productos CLAAS 2.1 y la Ecuación (1) para el cálculo de la COT. También se agradece a la Dra. Yolanda Sola y al Dr. Jeroni Lorente de Física de la Atmósfera del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Barcelona (UB), la reunión concertada para solventar las dudas que teníamos sobre si incluir los aerosoles o no en el modelo atmosférico para el cálculo definitivo de la radiación solar. Finalmente, agradecemos a nuestro colega Mario Padial su ayuda en la elaboración de los *scripts* más sofisticados.

4. BIBLIOGRAFÍA

Benas, N.; Finkensieper, S.; Stengel, M.; Van Zadelhoff, G.J.; Hanschmann, T.; Hollmann, R.; Meirink, J.F. (2017). "The MSG-SEVIRI based cloud property data record CLAAS-2". *Earth Syst. Sci. Data,* 9(2), pp.415-434. Doi: 10.5194/essd-9-415-2017

EUMETSAT Data Services. (2022a). *CLAAS: CM SAF Cloud Property Dataset using SEVIRI – Edition 1 – Hourly / Daily Means, Pentad Means, Monthly Means / Monthly Mean Diurnal Cycle / Monthly Histograms.* https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:CM:MSG:CLAAS_V001?query=&filter=satellite__MSG&filter=instrument__SEVIRI&filter=themes__Cloud&results=51&s=extended

EUMETSAT Data Services. (2022b). *CLAAS-2.1: CM SAF Cloud Property Dataset using SEVIRI – Edition 2.1.* https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:0279?query=&filter=satellite__MSG&filter=instrument__SEVIRI&filter=themes__Cloud&results=40&s=extended

EUMETSAT Data Services. (2020). *CM SAF Aerosol Optical Depth (AOD) Data Record – Edition 1.* https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:CM:MSG:AOD_SEVIRI_V001?query=&filter=satellite__MSG&filter=instrument__SEVIRI&filter=themes__Aerosol&results=11&s=extended

GEWEX Cloud Assessment. (2022). *Assessment of global cloud datasets from satellites.* https://climserv.ipsl.polytechnique.fr/gewexca/

GRUMETS. (2022). *SatCat: Servidor d'Imatges de Satèl·lit de Catalunya.* https://www.opengis.grumets.cat/wms/satcat/

Meirink, J.F.; Roebeling, R.A.; Stammes, P. (2013). "Inter-calibration of polar imager solar channels using SEVIRI". *Atmos. Meas. Tech.,* 6(9), pp.2495-2508. Doi: 10.5194/amt-6-2495-2013

MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. (2022a). *MODIS Aerosol Product.* https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod04.php

MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. (2022b). *MODIS Cloud Product.* https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod06.php

Pons, X. (1996). "Estimación de la Radiación Solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica". *VII Coloquio de Geografía Cuantitativa, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección.* Juaristi, J. i Moro, I. (eds.) Vitoria-Gasteiz. https://ddd.uab.cat/pub/poncom/1996/200247/Pons_1996_Estimacion_de_la_radiacion_solar_a_partir_de_modelos_digitales_de_elevaciones_Propuesta_metodologica_OCR.pdf

Pons, X.; Ninyerola, M. (2008). "Mapping a topographic global solar radiation model implemented in a GIS and refined with ground data". *Int. J. Climatol.,* 28, pp.1821-1834. Doi: 10.1002/joc.1676

Ruiz-Arias, J.A.; Pozo-Vázquez, D.; Santos-Alamillos, F.J.; Lara-Fanego, V.; Tovar-Pescador, J. (2011). "A topographic geostatistical approach for mapping monthly mean values of daily global solar radiation: A case study in southern Spain". *Agr. For. Met., Elsev.,* 151(2011), pp.1812-1822. Doi: 10.1016/j.agrformet.2011.07.021

Stengel, M.; Kniffka, A.; Meirink, J.F.; Lockhoff, M.; Tan, J.; Hollmann, R. (2014). "CLAAS: the CM SAF cloud property data set using SEVIRI". *Atmos. Chem. Phys.,* 14(8), pp.4297-4311. Doi: 10.5194/acp-14-4297-2014

Zhang, Y.; Li, X.; Bai, Y. (2015). "An integrated approach to estimate shortwave solar radiation on clear-sky days in rugged terrain using MODIS atmospheric products". *Sol. Energ., Elsev.,* 113(2015), pp.347-357. Doi: 10.1016/j-solener.2014.12.028



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 401-409

Análisis del hábitat de *Aquila fasciata* mediante datos satélite-GPS para la delimitación de sus áreas de conservación y áreas críticas en Aragón

M. Royo-Navascues[1,2], G. Fernández Olloqui[1,2], L.A. Longares[1,2]

[1] *Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza.*
[2] *Instituto Universitario de Ciencias Ambientales (IUCA), Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50.009 Zaragoza.*

mr@unizar.es, gfernandez@unizar.es, lalongar@unizar.es

RESUMEN: El avance de las tecnologías de análisis espacial y de seguimiento de especies han permitido el aumento del conocimiento en cuanto a biogeografía y el uso del territorio que realizan. Este conocimiento, se hace imprescindible para el diseño de planes de conservación y la gestión del propio territorio. En ese sentido, este trabajo pretende mostrar cómo, el uso de las nuevas tecnologías y el uso de los datos GPS de seguimiento por satélite de varios ejemplares de *Aquila fasciata*, pueden aportar información relevante sobre su distribución y el uso del territorio facilitando la delimitación de una manera más precisa de las áreas del plan de conservación y áreas críticas de esta especie. En este trabajo hemos podido comprobar, a través del estudio de las densidades kernel, que las áreas críticas establecidas por el Gobierno de Aragón en la creación del Plan de conservación de *Aquila fasciata* son correctas y se adecúan al uso del territorio que la especie hace. Además, hemos podido trasladar información fundamental a las autoridades para la creación de nuevas áreas, si fuese necesario, gracias al mapa de idoneidad creado.

Palabras-clave: *Aquila fasciata*, TIG, hábitat, Planes de Conservación.

1. INTRODUCCIÓN

El seguimiento individual tiene una larga tradición en la ornitología (López-López, 2016), principalmente llevado a cabo a través del anillamiento de aves (Newton, 2014). El avance de la tecnología ha permitido crear y utilizar nuevas metodologías que han posibilitado la obtención gran cantidad de información del comportamiento de las especies en el territorio. El seguimiento por radio de muy alta frecuencia (VHF) fue uno de los primeros avances tecnológicos utilizados durante décadas (Kenward, 2001). El transcurso de los años ha permitido la creación de dispositivos más pequeños que los que inicialmente se usaban, y sobre todo, ha permitido una mejora en cuanto al número máximo de ubicaciones registradas por día, la resolución temporal y espacial, el tamaño o el peso y el tamaño de la batería entre otros (López-López, 2016). Hoy en día, podemos encontrar dispositivos de pequeño tamaño, como los transmisores Argos/GPS, capaces de registrar una posición cada 2 o 3 horas (Cadahía et al., 2008).

La implementación del rastreo por GPS permite ampliar el conocimiento del comportamiento individual o colectivo (en el caso de marcar varios ejemplares) de una especie, pudiendo estudiar , entre otros, los roles y la jerarquía en los procesos de toma de decisiones (como por ejemplo, en el comportamiento de liderazgo en una bandada) (Flack et al., 2015; Kays et al., 2015).

El águila-azor perdicera es una especie que en España se puede encontrar en la franja de sierras costeras mediterráneas, en las CC.AA. de Cataluña, Comunidad Valenciana, Murcia y Andalucía, además, se encuentra ampliamente distribuida en Extremadura. De forma más irregular se puede ver en el interior de la península como en Aragón, Castilla-La Mancha, Castilla y León, Madrid, Navarra o La Rioja.

Las principales amenazas a las que está sometida la especie son la mortalidad por persecución directa, principalmente disparos, trampas y uso de venenos, electrocución y colisión con tendidos, pérdida de hábitat a causa de cambios en el uso del suelo y cambios en su propia dieta, motivado por la rarefacción del conejo, a enfermedades o fruto de la gestión inadecuada de recursos cinegéticos y de los usos del suelo (Real, 2004).

En Aragón la especie se encuentra dentro del Catálogo de Especies Amenazadas de Aragón (Decreto 49/1995, de 28 de marzo) y cuenta con Plan de recuperación aprobado por el Decreto 326/2011, el 27 de septiembre por el Gobierno de Aragón. A través de este Plan se pretende detener la regresión que está sufriendo la especie y su fragmentación en núcleos aislados. Dentro del ámbito de actuación, se crearon áreas críticas definidas como aquellas zonas vitales para la persistencia y recuperación de la especie.

En este sentido, el objetivo de este trabajo es proporcionar la información necesaria a la administración para comprobar el ajuste de cada área crítica establecida en el plan de conservación al uso teórico de la especie a través del cálculo de densidades y conocer qué áreas podrían ocupar los ejemplares en función de los usos del suelo y la topografía, proporcionando, de esta manera, información relevante para la creación y adecuación de los planes de conservación de la especie.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio de este trabajo se centra en la Comunidad Autónoma de Aragón, donde tienen gran parte de su área de distribución los 18 ejemplares marcados con dispositivos GPS. En algún caso, la presencia de puntos fuera de los límites administrativos de la comunidad obligó a la creación de un buffer de 60 km para la selección de todos los puntos más cercanos a las áreas críticas establecidas por el Gobierno de Aragón.

2.2. Materiales

Los materiales utilizados para la realización de este estudio fueron proporcionados por la Dirección general de Medio Ambiente y Gestión Forestal del Gobierno de Aragón. Este material consistía en los datos GPS registrados para cada uno de los 18 ejemplares marcados durante año y medio (registrando una posición cada 15 minutos) y la delimitación de las zonas del ámbito de actuación del Plan de conservación además de la delimitación de las áreas críticas establecidas dentro del mismo.

2.2.1. Homogeneización de la base de datos y preparación de los datos

La utilización de tecnología de seguimiento GPS provoca el manejo de miles de puntos para cada ejemplar, debiendo realizar un análisis previo de los mismos. La homogeneización de los mismos ha consistido en la comprobación de cada uno de los puntos, eliminando aquella información obtenida con el GPS que carecía de coordenadas derivado de algún error con el emisor y por ende, información imposible de representar espacialmente.

2.3. Estudio de Densidades a través del análisis Kernel y superficie utilizada

Al igual que con la evolución de los dispositivos GPS, el avance de las nuevas tecnologías permite crear flujos de trabajo necesarios para el análisis de grandes conjuntos de datos. En un primer instante, para cada uno de los ejemplares se calculó el polígono mínimo convexo utilizando la herramienta "Convex Hull" integrada en el software ArcGis. Este polígono nos permitió conocer, de manera óptima, la superficie de terreno que cada uno de los ejemplares ha utilizado durante el año y medio de seguimiento. Posteriormente, se calculó el centroide del polígono para seguidamente, calcular la distancia existente entre cada uno de los puntos registrados y el centroide, ambas acciones llevadas a cabo dentro del mismo programa.

Los percentiles utilizados para el estudio de las densidades han sido 70%, 80% y 90%. Dichos porcentajes se obtuvieron seleccionando el 70% de los datos que menor distancia tenían al centroide, posteriormente el 80% y finalmente el 90%, eliminando, por tanto, los datos que se encontraban a mayor distancia del centroide. Una vez seleccionados los datos de cada uno de los percentiles se calculó de nuevo el polígono mínimo convexo y se estableció el territorio utilizado por cada nuevo grupo de datos, ya que éste cambia en función del número de puntos utilizados.

Por último, se calcularon las densidades para cada uno de los percentiles utilizando la herramienta "Calculate density", integrada en las herramientas de análisis del software ya mencionado, y se establecieron cuatro categorías en función de la concentración de los puntos obtenida en este proceso, distribución poco concentrada, distribución moderadamente concentrada, distribución concentrada y distribución muy concentrada.

Por último, se obtuvo el porcentaje de puntos registrados dentro de cada una de las categorías para cada uno de los ejemplares además de calcular la superficie total utilizada.

2.4. Análisis de los Usos del Suelo y variables topográficas

Para conocer los diferentes usos del suelo que han recorrido los ejemplares se ha procedido a la utilización del mapa digital del Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE, 2014). Para realizar una caracterización del relieve de la zona de estudio se han utilizado las variables topográficas altitud y pendientes, derivadas del modelo digital de terreno (MDT05) disponible en el servicio (CNIG) de Infraestructuras de Datos Espaciales (IDEE). En el caso de las variables topográficas se llevó a cabo una reclasificación de las mismas con el fin de obtener una caracterización más detallada del relieve, estableciendo de esta forma una tipología del relieve (Tabla 1):

Tabla 1: Reclasificación de las variables topográficas

Altura (en m)	clasificación	Tipo relieve	Pendientes (en grados)	Clasificación	Tipo relieve
0 - 400	1000	Valles, llanuras y depresiones	0 - 3	100	Zonas llanas
400 - 800	2000	Piedemontes	3 - 10	200	Zonas de ligera pendiente como glacis
800 - 1200	3000	Parameras, muelas, colinas y sierras	10 - 30	300	Laderas y zonas alomadas
1200 - 1800	4000	Montaña media	> 30	400	Zonas escarpadas
> 1800	5000	Alta montaña			

El análisis de los datos obtenidos se realizó tanto a nivel conjunto como de manera individual para cada uno de los ejemplares. Se desarrolló mediante el denominado método jerárquico realizado en el software libre de RStudio y utilizando el lenguaje de programación R. Este análisis tiene como finalidad agrupar un conjunto de objetos individuales para la creación de nuevos grupos o bien, separar los ya existentes para formar otros dos, de tal forma, que, si se realiza este proceso de aglomeración o división sucesivamente, se pueda minimizar alguna distancia o maximizar alguna medida de similitud (Espinel, 2015). El método de jerarquización que se utilizó fue el de Ward dado que es el que mayor sentido estadístico tiene en el caso de variables continuas, ya que, en el proceso de cálculo, en cada repetición del algoritmo, se obtienen grupos donde la varianza dentro de los mismos es mínima y, por ende, la varianza entre grupos es máxima (Guillén 2014; Ortiz et al., 2012).

Para visualizar los datos de manera individual y, hacerlos comparables entre ejemplares, se realizó un análisis de frecuencias y se representaron a través de *"heatmaps"* o mapas de calor.

2.5. Análisis de idoneidad para la especie

Los mapas de idoneidad constituyen un instrumento de gran utilidad para generar cartografías que permitan encontrar aquellas zonas que sean idóneas para la presencia de las especies. Las variables utilizadas para determinar esta idoneidad han sido los usos del suelo y las dos variables topográficas, alturas y pendientes. Ambas variables han sido reclasificadas de 0 a 3 según el porcentaje de puntos registrados en cada uso del suelo o en cada altura, siendo 0 aquellos usos, alturas o pendientes que menor porcentaje de puntos concentran y 3 los que mayor porcentaje de puntos concentran. Por ejemplo, en cuanto a los usos del suelo, los bosques de coníferas, matorrales y combinación de vegetación que son los tres que mayor porcentaje de puntos han registrado (más del 70% de los puntos registrados han sido en estos usos), serían los usos que obtendrían un 3, y por el contrario, todas las zonas urbanas, infraestructuras, viñedos, frutales u olivares, obtendrían en esta clasificación un 0. En cuanto a las variables topográficas, la categoría 2300 y 2200, que concentran más del 50% de los puntos registrados, serían las que obtendrían un 3 en la reclasificación, mientras que las categorías 4300, 4100 o 4200 obtendrían un 0.

Una vez reclasificados los usos del suelo y las variables topográficas, se procedió a la suma de las dos capas ráster mediante la calculadora ráster. El resultado obtenido será una capa con valores de 0 a 6, que nos permitirá establecer qué zonas son idóneas para la presencia de la especie. Estas zonas obtenidas fueron clasificadas en zonas de ámbito no favorable (valores 0, 1 y 2), poco favorable (zonas con valores 3), favorable (aquellas zonas que tengan valores 4) y por último, zonas altamente favorables (valores de 5 y6).

3. RESULTADOS

3.1. Densidades Kernel

El cálculo de las densidades kernel nos ha permitido conocer cómo se mueven los ejemplares y nos ha facilitado la observación del uso del territorio que han realizado. El producto final han sido tres cartografías (una por cada percentil estudiado) para cada uno de los ejemplares. En estas cartografías se puede observar las densidades obtenidas en el proceso y la localización de las áreas de ámbito de actuación y de las áreas críticas. La figura 1 es un ejemplo de las cartografías resultantes.

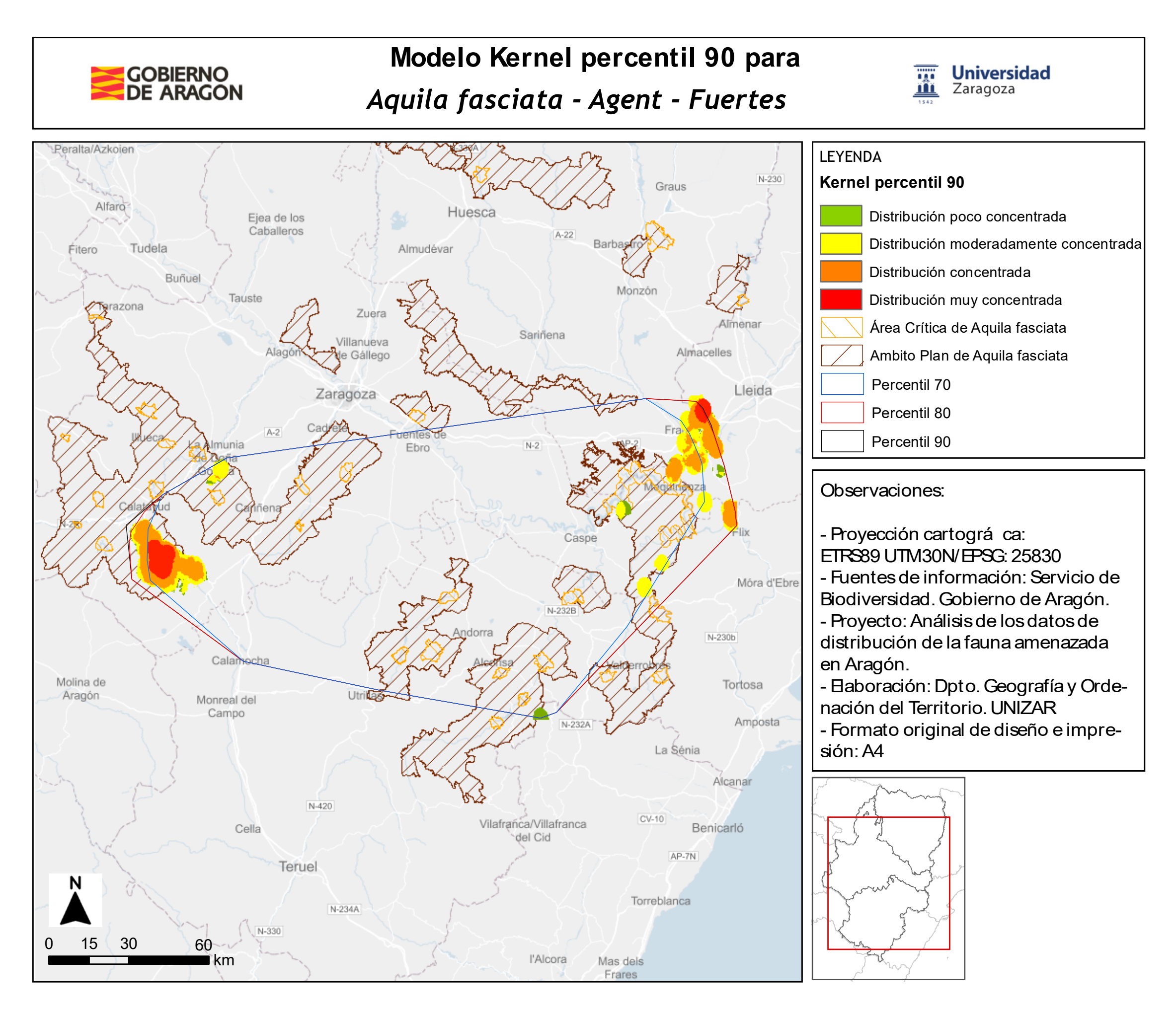


Figura 1. Ejemplo de cartografía final realizada para cada uno de los ejemplares

Tras calcular las densidades para cada uno de los ejemplares, se procedió a definir qué superficie ocupa cada uno de ellos. La superficie ocupada varía entre ejemplares, obteniéndose "*homerange*" de más de 400 km^2 como en el caso del ejemplar Forco y Navallo (Tabla 2).

Tabla 2. Superficie de los "*homerange*" en km^2 para cada uno de los ejemplares

	Rebuxenca	Agent	Azahara	Badina	Chicaleta	Cierzo	Elisa	Erfe	Forco
Superficie Polígono mínimo 90 (PMC) (km^2)	302	19,63	270,30	109	570	315	114	347	472
	Gabarr	Magn	Martn	Mascn	Navallo	Sonia	Sotal	Tomillo	Tonda
	105	283	17,20	151	90	156	126	343,95	35,50

Por otro lado, concluimos que el 95% del total de puntos registrados se encontraban dentro de las áreas establecidas en el Ámbito del Plan de Conservación de la especie y un 65% del total se encontraban

dentro de las áreas críticas establecidas desde las autoridades (Tabla 3):

Tabla 3: Porcentaje de puntos dentro de las áreas establecidas en el Plan de Conservación de Aquila fasciata

	Nº Total de puntos	*Porcentaje*
Puntos Perdicera	85.618	100
Puntos dentro de Ámbito	81.589	95
Puntos dentro Áreas Críticas	55.640	64

3.2. Usos del suelo y variables topográficas

El análisis de usos del suelo y de pendientes y alturas a través del método jerárquico ha arrojado que la categoría más utilizada en general es "Bosque de Coníferas" (312) representando el 32% de los puntos, seguida muy de cerca de "Matorral" y "Combinación de vegetación" (330 y 340, respectivamente), representando el 21% y el 20%, respectivamente. Con frecuencias más bajas se encuentran las categorías "Pastizal o herbazal" (320) y "Combinación de cultivos con vegetación" (260), representando el 5% y el 4% de los puntos registrados (Figura 2a).

Por otro lado, el análisis del relieve muestra cómo un 28% de los puntos registrados han sido mayoritariamente en zonas con alturas comprendidas entre los 400 y los 800 metros y unas pendientes entre 10 y 30 grados (Categoría 2300). Seguidamente, encontramos zonas con alturas entre los 400 y 800 metros pero con pendientes entre 3 y 10 grados (Categoría 2200), representando el 24% de los puntos. Con porcentajes por debajo del 20% se encuentran aquellas zonas con altura entre 0 y 400 metros (categoría 1200) y pendientes entre 3 y 10 grados y zonas con alturas entre 800 y 1200 metros con pendientes entre 10 y 30 grados (categoría 3300), las cuales representan el 15% y el 10% de los puntos, respectivamente (Figura 2b).

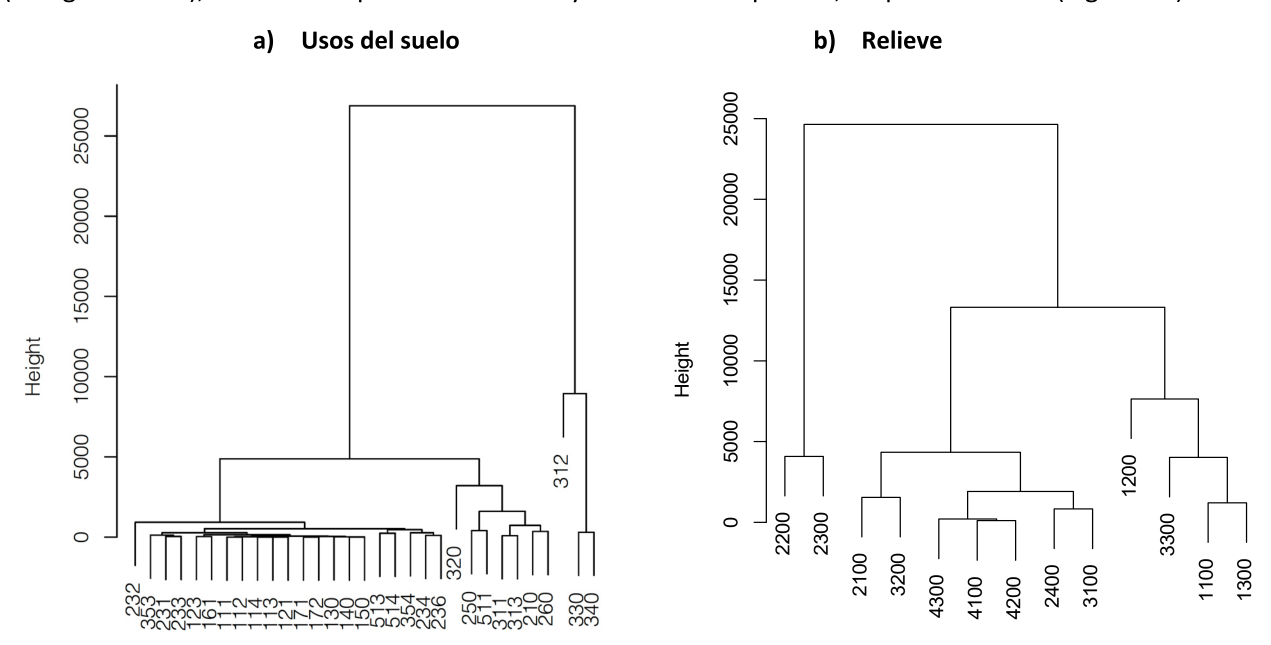


Figura 2: a) Análisis clúster de usos del suelo, b) relieve para el conjunto de datos. Elaboración propia.

En cuanto al análisis del suelo de forma individual, los "heatmap" nos han permitido comparar el uso del suelo que mayoritariamente ha utilizado cada ejemplar, pudiendo observar si había diferencias de comportamientos dentro de la especie.

En el caso del ejemplar llamado Rebuxenca (figura 3a), hay una clara utilización del "Bosque mixto" (categoría 313) respecto al resto de usos del suelo. En el ejemplar Cierzo, se puede observar cómo existen tres categorías de uso del suelo con mayor frecuencia de utilización, como son "Bosque de Coníferas" (categoría 312), "Bosque mixto" (categoría 313) y "Combinación de vegetación" (Categoría 340). En el ejemplar Erfe, sobresale la utilización del "Bosque de Coníferas" (categoría 312) respecto al resto de usos del suelo, y

para Forco, serán los “Bosques de coníferas” (categoría 312), “Matorral” (categoría 330) y la “Combinación de vegetación” (categoría 340). En general, se puede observar cómo las categorías que mayoritariamente sobresalen en los ejemplares son “bosque de coníferas”, “bosque mixto” y “Combinación de vegetación”.

En cuanto a la variable topográfica, el resultado de los mapas de calor los podemos observar en la figura 3b. En general las categorías 2200 (alturas de 400 a 800 metros y pendientes entre 3 y 10 grados) y 2300 (alturas de 400 a 800 metros y pendientes entre 10 y 30 grados) son las que mayor frecuencia de uso arrojan individualmente. Destaca el ejemplar Rebuxenca como el ejemplar con mayor porcentaje de puntos en esas dos categorías respecto al resto, en el cuál casi el 50% de los puntos se registran en la categoría 2300 y el 42% en la 2200. Otro de los ejemplares que obtiene mayores porcentajes de puntos en alguna categoría es Forco. Al igual que Rebuxenca, Forco frecuenta con mayor asiduidad las categorías 2200 y 2300, representando el 43% y el 49% de los puntos, respectivamente. En el caso del ejemplar Cierzo además de las dos categorías mencionadas en los anteriores ejemplares obtiene un porcentaje mayor en la categoría 3300, representando mas del 36% de los puntos, seguida de la categoría 2300 con un 31% y la 2200 con un 19%.

Por otro lado, Erfe y Sotal son dos ejemplares cuyas mayores frecuencias se localizan en la categoría 1200 (alturas de 0 a 400 metros y pendientes entre 3 y 10 grados), representando en el caso del ejemplar Erfe más del 50% de sus puntos registrados y en Sotal, el 33%. Además, en ambos casos la segunda categoría con mayor número de puntos es la 1300, con un 36% y 31%, respectivamente.

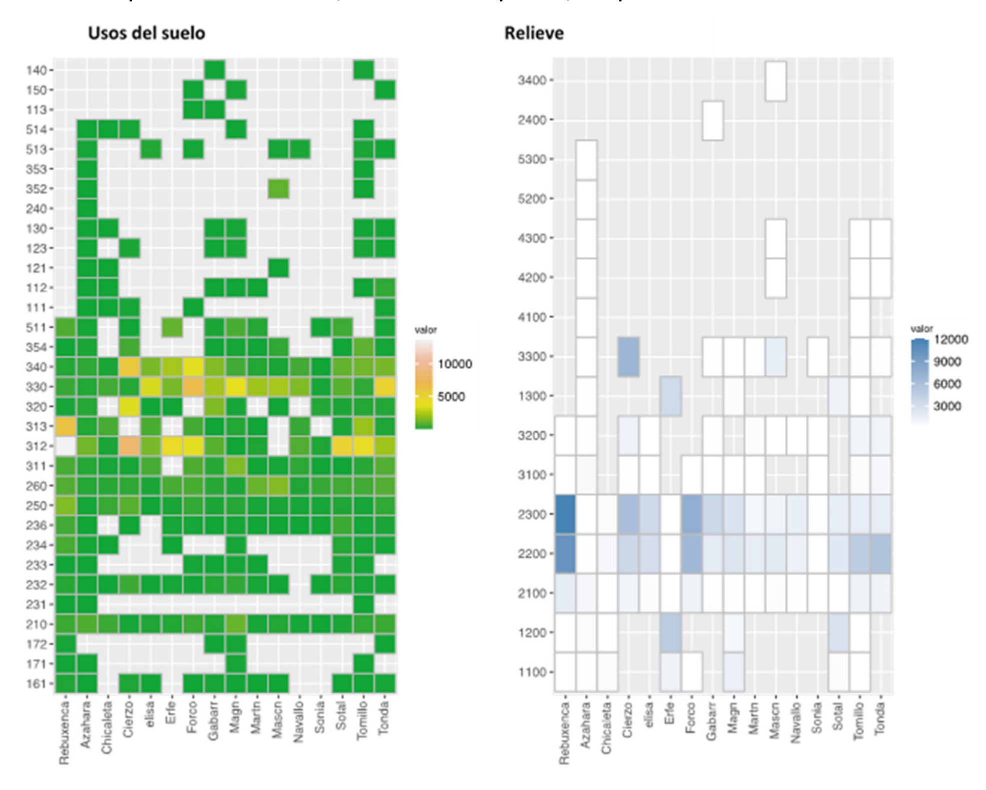


Figura 3: a) “Heatmap” de los usos del suelo para cada ejemplar, b) “heatmap” de las categorías de relieve para cada ejemplar. En ambos casos la leyenda expresa el número de localizaciones que se registran en cada tipología de uso del suelo y de relieve. Elaboración propia.

3.3. Mapa de Idoneidad

El estudio de las zonas de idoneidad permite obtener un mapa donde se observa la distribución de las zonas con condiciones más favorables para la especie (figura 4). Las zonas favorables y altamente favorables se encuentran repartidas en tres franjas muy marcadas en la comunidad. Una primera franja sería la zona entre el Somontano pirenaico y el Prepirineo, con elevaciones no muy altas. Algunas de estas zonas idóneas para la especie se encuentran en la Comarca de las Cinco Villas, zonas bajas en los alrededores de la Sierra de Loarre, Comarca del Somontano de Barbastro y zonas limítrofes con Cataluña. La segunda franja se localiza en la Depresión del Ebro, encontrando zonas idóneas en los Montes de Zuera, Comarca de Tarazona, algunas zonas de la Sierra de Alcubierre y al sur de la ciudad de Zaragoza. La tercera franja serían aquellas zonas que se distribuyen por el Sistema Ibérico, apareciendo zonas favorables en Calatayud, y al este de la comunidad,

entre las localidades de Híjar, Andorra y Alcañiz.

Las zonas de ámbito poco favorable son la que mayor extensión tienen dentro de la comunidad. Se pueden localizar mayoritariamente en la Depresión del Ebro, pero también se localizan en zonas del Pirineo y prepirineo y en zonas localizadas al sur de la provincia de Teruel.

Por otro lado, las zonas no favorables para la especie son aquellas con alturas y pendientes más elevadas. Siguiendo el esquema anterior, la primera franja no favorable sería la zona de los Pirineos, donde se encuentras las elevaciones con más altura de toda la comunidad, y las sierras de mayor altura del Somontano pirenaico. La segunda franja con zonas no favorables serían las que se encuentran en el Valle del Ebro, como la propia ciudad de Zaragoza. Por último, la tercera franja y la más importante en cuanto a extensión, es la que se localiza en el Sistema Ibérico, donde las alturas de las serranías hacen que la mayor parte del sur de la comunidad sean zonas no favorables para la especie.

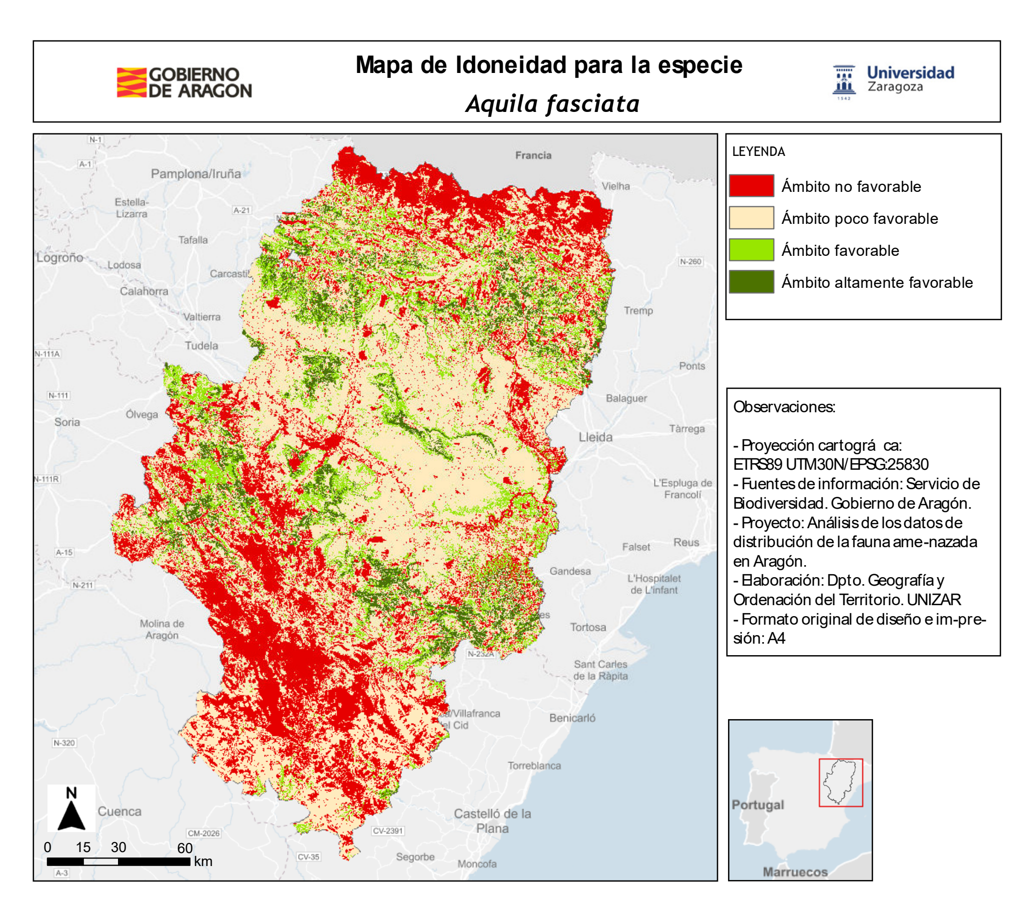


Figura 4: Mapa de Idoneidad para la especie Aquila fasciata. Elaboración propia

4. DISCUSIÓN

La utilización de datos satélite-GPS para el seguimiento de las especies permite obtener un gran volumen de datos necesarios para el estudio del hábitat y del uso del territorio que realizan las especies. En este caso, el seguimiento de varios ejemplares de *Aquila fasciata* nos ha permitido conocer cómo utilizan el territorio y, sobre todo, si las áreas establecidas en los Planes de Conservación se adecúan a la distribución de la misma.

El estudio de las densidades de cada ejemplar, muestra los espacios de mayor concentración de la especie, comprobando si las áreas establecidas en el Plan de Conservación se adecuan al uso del territorio. En ese aspecto, hemos evidenciado que las áreas establecidas por el Gobierno de Aragón recogen el uso del territorio que hacen los ejemplares de *Aquila fasciata* marcados.

Los territorios ocupados por las perdiceras en general son muy variados en España. En el caso de Aragón, los usos del suelo que mayoritariamente ha utilizado han sido zonas de bosques de coníferas, zonas de matorral y otras zonas con una combinación de vegetación. Estos usos del suelo concuerdan con algunos autores que señalan esta variedad (Gil-Sanchéz y Garrido 1996, F. M. y Serrano 1996; Rico-Alcázar et al. 2001;

Sánchez-Zapata y Calvo 1999)

A pesar de la gran variedad de usos del suelo, nuestros resultados en cuanto a las variables del relieve coinciden con la comunidad científica (López-López et al., 2006; Muñoz et al., 2005; Ontiveros, 1999), y es que los ejemplares estudiados, prefieren zonas donde la pendiente es sus valores medios es moderada, tal y como muestran las zonas más utilizadas (alturas comprendidas entre 400 y 800 metros con pendientes entre 10 y 30 grados). Estos resultados no son de extrañar teniendo en cuenta que la perdicera es una especie dependiente de los roquedos para la nidificación y no necesariamente tienen que ser grandes cortados o paredes donde la topografía en su contexto general es claramente abrupta.

En cuanto a las zonas idóneas para la perdicera obtenemos cierta diversidad de espacios. Por un lado, obtenemos zonas favorables en algunas sierras como la de Loarre, sierras del Prepirineo o al sur en el Sistema Ibérico, donde, como hemos comentado anteriormente, la presencia de zonas con cierta pendiente son necesarias para la nidificación. Pero también encontramos territorios más llanos, como la Depresión del Ebro. Estas zonas suelen ser utilizadas por los ejemplares jóvenes, los cuales no necesitan la presencia de roquedos de nidificación (Mañosa et al., 1998) y se dispersan en cualquier dirección.

5. CONCLUSIONES

La utilización de las nuevas tecnologías para el estudio de las especies nos proporciona valiosa información para la creación de planes de conservación y para la propia gestión del territorio. En este caso, la combinación de datos satelitales y Tecnologías de Información Geográfica, ha permitido conocer cómo utilizan el territorio los ejemplares marcados de *Aquila fasciata*, comprobando la adecuación de las áreas establecidas en el plan de conservación de la especie. Además de los datos satelitales, la creación de un mapa de idoneidad para la especie, ha proporcionado valiosa información para los gestores, sirviéndoles como base para definir nuevas delimitaciones o áreas críticas o para modificar las ya existentes.

La posibilidad de actualizar la información del seguimiento por satélite de los ejemplares, así como incorporar nuevas variables en la creación del mapa de idoneidad relacionadas por ejemplo con la disponibilidad de presas, confiere un carácter dinámico a este tipo de análisis, necesario para la revisión, actualización y adecuación de los Planes de Conservación de especies de fauna, dado su carácter dinámico y susceptible a cualquier cambio de uso en el territorio. En este sentido los Sistemas de Información Geográfica, adquieren una relevancia especial, facilitando esta tarea y convirtiéndose en una herramienta fundamental para la conservación de especies y la toma de decisiones relacionada con ello.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto 2021/0214. Análisis de los datos de distribución de fauna amenazada de Aragón RB 14022. Servicio de Biodiversidad Dirección General de Medio Natural y Gestión Forestal. Dpto. Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente. Gobierno de Aragón.

6. BIBLIOGRAFÍA

Cadahía, L., López-López, P., Urios, V., Negro, J. J. (2008). Estimating the onset of dispersal in endangered Bonelli's Eagles Hieraaetus fasciatus tracked by satellite telemetry: A comparison between methods. *Ibis*, *150*(2), 416–420. https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2007.00781.x

Cramp, S., Simmons, K. E. L. (1980). Handbook of the Birds of Europe the Middle East and North Africa . The Birds of the Western Paleartic. *Oxford University Press*, *Volume II*.

Espinel, P. (2015). Procedimiento para efectuar una Clasificación Ascendente Jerárquica de un Conjunto de Puntos utilizando el Método de Ward. *Infociencia*, *9*(1), 13–18. https://doi.org/https://doi.org/10.24133/infociencia.v9i1.977

Flack, A., Biro, D., Guilford, T., Freeman, R. (2015). Modelling group navigation: Transitive social structures improve navigational performance. *Journal of the Royal Society Interface*, *12*(108). https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0213

Gil-Sanchéz, J. M., Garrido, F. M. and Serrano, G. V. (1996). Selección de Hábitat de Nidificación por el Águila Perdicera (Hieraaetus fasciatus) en Granada (SE de España). *Ardeola*, *43*(2), 189–197.

Guillén, A. A. (2014). Aproximación de mediciones de tensión perdidas en sistemas de potencia por sensibilidad y disimilitud. *Tesis Doctoral. Universidad de Costa Rica*, *July 2014*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34349.44005

Kays, R., Crofoot, M. C., Jetz, W., Wikelski, M. (2015). Terrestrial animal tracking as an eye on life and planet. *Science*, *348*(6240), aaa2478. https://doi.org/10.1126/science.aaa2478

Kenward, E. (2001). A Manual for Wildlife Radio Tagging. *Academic Press. London*.

López-López, P. (2016). Individual-Based Tracking Systems in Ornithology: Welcome to the Era of Big Data. *Ardeola*, *63*(1), 103–136. https://doi.org/10.13157/arla.63.1.2016.rp5

López-López, P., García-RipolÍs, C., Aguilar, J. M., Garcia-López, F., Verdejo, J. (2006). Modelling breeding habitat preferences of Bonelli's eagle (Hieraaetus fasciatus) in relation to topography, disturbance, climate and land use at different spatial scales. *Journal of Ornithology*, *147*(1), 97–106. https://doi.org/10.1007/s10336-005-0019-3

Muñoz, A. R., Real, R., Barbosa, A. M., Vargas, J. M. (2005). Modelling the distribution of Bonelli's eagle in Spain: Implications for conservation planning. *Diversity and Distributions*, *11*(6), 477–486. https://doi.org/10.1111/j.1366-9516.2005.00188.x

Newton, I. (2014). Is bird singing still necessary. *British Birds*, *107*(4).

Ontiveros, D. (1999). Selection of nest cliffs by Bonelli's Eagle (Hieraaetus fasciatus) in southeastern Spain. *Journal of Raptor Research*, *33*(2), 110–116.

Ortiz, J. E., Cruz, D. L., Pardo, C. E. (2012). Analisis de datos textuales con DtmVic. *Universidad Nacioanl De Colombia Bogota, Universidad Santo Tomas Bogota*.

Real, J. (2004). Águila-Azor Perdicera. In A. Madroño, C. González, J. . Atienza (Eds.), *Libro Rojo de las aves de España* (pp. 154–157). SEO/BirdLife. Madrid.

Rico-Alcázar, L., Martinez, J., Moran, S., Navarro, J., Rico, D. (2001). Preferencias De Hábitat Del Águila-Azor (E De España) a Dos Escalas Espaciales. *Ardeola*, *48*(1), 55–62.

Sánchez-Zapata, J. A., Calvo, J. F. (1999). Raptor distribution in relation to landscape composition in semi-arid Mediterranean habitats. *Journal of Applied Ecology*, *36*(2), 254–262. https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.1999.00396.x



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 410-419

Linkage Mapper como herramienta para cuantificar cambios en la conectividad ecológica por cambios de uso de suelo y barreras

H. Sampietro Lardiés, L.A. Longares Aladrén[1]

[1] *Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, San Juan Bosco 7 - 50009 Zaragoza*

hectorsampietro@gmail.com, lalongar@unizar.es,

RESUMEN: En este trabajo se analizan los posibles efectos sobre la conectividad ecológica de la red Natura 2000, si se instalasen los parques eólicos ya proyectados en la provincia de Teruel. El estudio se centrará sobre 5 grupos de animales (mamíferos terrestres, aves forestales, esteparias, planeadoras y rapaces). Para ello, se planteó el uso de *Linkage Mapper* como herramienta para estudiar desde el punto de vista teórico la situación actual y la situación derivada de la instalación de los parques eólicos, comparando entre ambas situaciones.
Del amplio abanico de outputs que *Linkage Mapper* ofrece, se usaron los correspondientes a (1) coste truncado normalizado, (2) valor de corredor combinado, (3) cuellos de botella y (4) barreras. Se llevó a cabo el siguiente procedimiento: (1) sumatorio de los cuatro resultados individuales para los cinco grupos de especies usadas, obteniendo una valoración global, para la situación actual y posterior al cambio, (2) diferencias entre la situación posterior y la situación actual, para cada grupo de especies y para el conjunto, y (3) visualización e interpretación de cada resultado, tanto individual como global, para la situación actual, posterior y la diferencia entre ambas.
Los resultados han mostrado que la aparición de superficies de mayor fricción implican un cambio en la red de corredores Los cambios obtenidos con el análisis comparativo son de varios tipos. O bien se produce un mantenimiento del corredor, con un mayor coste de desplazamiento, o bien es generado desplazamiento del corredor a los laterales del nuevo elemento perturbador. Además, los efectos en la red pueden ser o bien locales, afectando únicamente al entorno próximo, o bien globales, haciendo que áreas lejanas en principio desfavorables adquieran valor como corredor en detrimento de otras áreas que originalmente constituían un corredor.

Palabras clave: Red Natura 2000, parques eólicos, mamíferos terrestres, aves.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El estudio de la conectividad estructural del hábitat es análogo al de la propia fragmentación, y está basado en parámetros de vecindad o distancia euclidiana entre las manchas (Gurrutxaga y Lozano, 2007).

En múltiples trabajos que tratan sobre la evaluación de la conectividad ecológica, se propone una metodología de medición de la conectividad funcional basada en la resistencia, fricción o impedancia, que oponen los diferentes usos del suelo al desplazamiento de las especies entre las manchas de hábitat, es decir, superficies de coste (cost surface) (Gurrutxaga et al., 2010; Gurrutxaga, 2007; Gurrutxaga y Lozano, 2007; Rodríguez et al., 2018; Ruiz-González et al., 2010), o denominada también distancias ponderadas de coste (cost-weighted distance) o análisis de rutas de mínimo coste (least-cost path analysis) (Gurrutxaga, 2007). Esta metodología se basa en la configuración de mapas de resistencia o fricción (Knaapen et al., 1992). Es una metodología tiene ventajas frente a otros tipos de modelización de cara a la delimitación de corredores ecológicos en el territorio (Gurrutxaga, 2007).

Así, el método de las superficies de coste, calcula el coste acumulado de desplazamiento de la especie desde los fragmentos que ocupa (celdas-origen). Este coste de desplazamiento entre dos localidades también se denomina "distancia efectiva" o "distancia funcional" (Gurrutxaga, 2007) y se estima considerando la resistencia que oponen las celdas correspondientes a los diferentes ecotopos del paisaje que han de atravesar para desplazarse entre aquellos (Sastre et al., 2002).

El cálculo de rutas de mínimo coste de desplazamiento constituyen además una herramienta para el

diseño y planificación de corredores ecológicos en el paisaje, modelando la relación entre paisaje y movilidad de organismos con capacidad de movimiento (Gurrutxaga, 2007). Así, un modelo de conectividad se genera basado en el coste de rutas de mínimo coste entre cada par de áreas núcleo (Sastre et al., 2002).

1.2. Justificación y objetivos

En el presente trabajo, se ha propuesto el empleo de las TIG con el fin de localizar, diseñar corredores ecológicos y valorar cual sería el cambio generado por la intrusión de barreras sobre los corredores ecológicos teóricos existentes actualmente, usándose la herramienta *Linkage mapper*. En este caso, se ha valorado la intrusión de los parques eólicos proyectados, y admitidos a trámite, y de información (IDEAragon) pública a fecha de julio de 2021, para la Provincia de Teruel, usándose como áreas núcleo la Red Natura 2000 (RN). Para ello, los objetivos son: (1) evaluar la situación actual; (2) evaluar la situación hipotética en la cual todos los parques eólicos proyectados y admitidos a trámite se ejecutan, y cuantificar el efecto de los mismos; y (3) llevar a cabo una comparativa entre ambas situaciones, generándose un estudio de los cambios esperables en la conectividad.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La provincia de Teruel abarca un total de 14.809 km^2 alberga una amplia variedad de Espacios Naturales Protegidos, así como de espacios de la RN, que incluyen ambas, Zonas de Especial Conservación (ZEC, anteriormente Lugares de interés comunitario, LIC) y las Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA). La RN ocupa en conjunto el 29 % del territorio (Figura 1), y constituye las áreas núcleo de este estudio, metodología que ya tiene antecedentes (Gurrutxaga *et al*., 2010; Rodríguez *et al*., 2018).

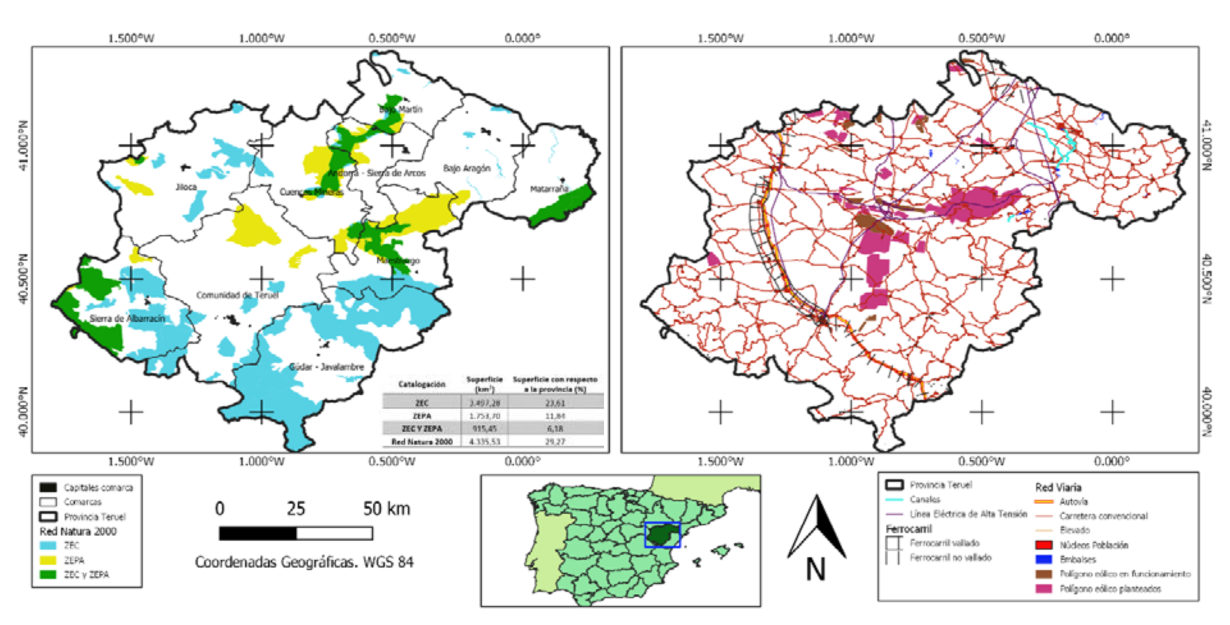


Figura 1. Mapa Red Natura 2000 y ubicación de la Provincia de Teruel.

En cuanto a especies objetivo se refiere, dado que se va a evaluar la conectividad entre la RN, se considera utilizar grupos de especies (tomándose como antecedentes Ersoy et al., 2019 y Pereira et al. 2017), que engloben a aquellas con capacidad de dispersión a nivel regional. Por ello, y considerando las características, variabilidad de ecosistemas, y diversidad faunística de la provincia de Teruel, se eligen los siguientes grupos, basándose los valores de fricción en el comportamiento de varias especies emblemáticas para cada grupo: (1) Mamíferos terrestres no voladores, (2) aves planeadoras (F. Ciconiidae, Gruiidae, Accitripidae), (3) otras aves rapaces (F. Falconiidae), (4) aves forestales y (5) aves esteparias y de medios agrícolas. Las áreas núcleo correspondientes a cuevas se han tenido en cuenta para las aves esteparias y forestales, incluyendo dentro de estos grupos a los murciélagos que tengan hábitats semejantes a los de estos grupos. El proceso seguido se muestra en la Figura 2. Las distintas variables y capas origen usadas se muestran en la Tabla 1, incluyéndose en todo caso los elementos presentes dentro de la Provincia, y no los elementos colindantes a la misma. Las distintas barreras empleadas aparecen representadas en la Figura 1, siendo éstas elementos que implican cambio en patrones de movimiento, e incluso mortalidad según cada caso concreto.

Tabla 1. Variables empleadas y capa de origen

Variable	*No*	*Capa origen*	*Fuente*
Pendiente	1	Modelo Digital del Terreno	Instituto Geográfico Nacional
Áreas Núcleo	2	Red Natura 2000 (ZEC + ZEPA)	IDEAragon
Usos del Suelo	3	SIOSE 2014	WFS IDEAragon
Barreras a integrar a mapa usos de suelo	4	Red viaria (no subterránea)	IDEAragon
	5	Ferrocarril (vallado, no vallado)	Fotointerpretación a partir de IDEAragon
	6	Red Eléctrica Alta Tensión	Fotointerpretación a partir de entsoe (2019)
	7	Canales	Fotointerpretación a partir de IDEAragon
	8	Embalses	IDEAragon
	9	Parques eólicos en funcionamiento	IDEAragon (julio 2021)
	10	Parques eólicos proyectados y admitidos a trámite, y aquellos con permiso previo y de construcción	

A todas las capas lineales (números 4 a 7) se les aplica un buffer de 30 metros. Estos buffers, junto al resto de capas poligonales, son integrados a la capa SIOSE. A esta capa de superficies se le añaden campos con los valores de fricción para los distintos grupos de fauna (Tabla 3). Finalmente, esta capa es transformada en 5 ráster (uno para cada grupo) con un tamaño de celda de 25 m. Integrándose la información de las capas 3 a 9 se obtiene una capa de cobertura de suelo actual; e, integrándose la capa nº 10, se obtiene la capa de cobertura de suelo posterior, integrándose así el cambio de uso del suelo.

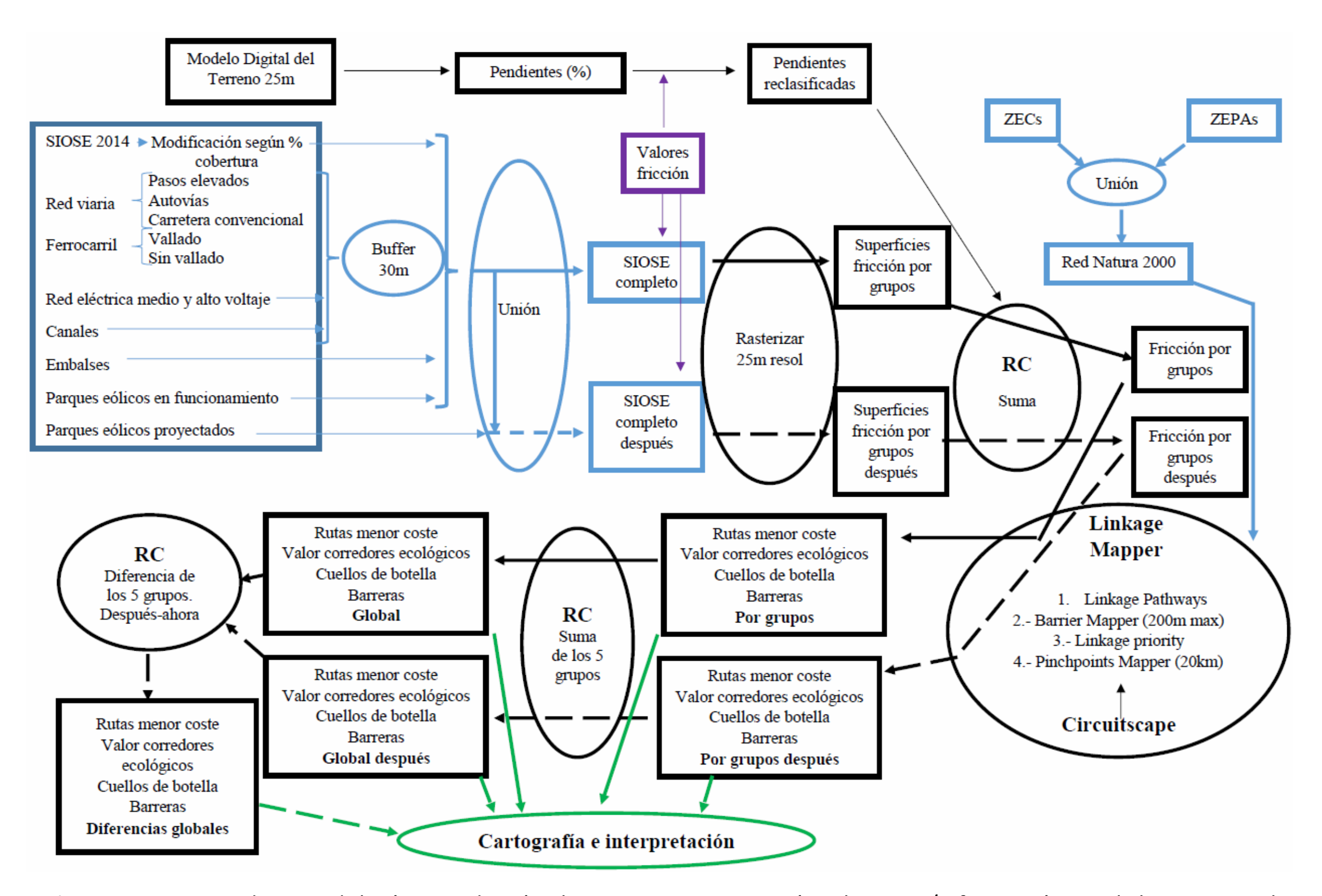


Figura 2. Esquema de metodología seguida. Círculos son procesos. Rectángulo capas/información. Azul clase vectorial. Negro clase ráster. Morado tabla. Línea intermitente situación posterior instalación parques. RC=Raster calculator.

A cada uno de estos elementos se les da un valor de fricción; es decir, el coste que tiene para un ejemplar (o grupo de especies como es el caso) recorrer ese espacio según sus preferencias de hábitat. Estos valores de fricción se establecen según estudios previos, o según el conocimiento que hay sobre el comportamiento de cada grupo de especies (Tabla 3).

El rango de valores varía entre 1 y 1000, tal y como se ha hecho en múltiples estudios que estudian los mamíferos terrestres (Gurrutxaga et al., 2010; Gurrutxaga, 2007; Ruiz-González et al., 2010; Zhou y Song, 2021), y cuyos valores para este grupo son en buena parte integrados en la Tabla 3; los valores aplicados a los grupos de aves fueron aplicados en función de sus distintas capacidades de movimiento y predisposición de hábitats según múltiples fuentes bibliográficas. Ya que las especies tienden a desplazarse por aquellas superficies más semejantes a su hábitat preferente (Eycott et al., 2012), a las áreas que presentan estas características se les da un valor 1 y, por el contrario, aquellas que generan más rechazo se les da un valor máximo. Para las superficies resultado de la mezcla de 2 o más puras, se les da un valor intermedio, de manera semejante a Knaapen et al. (1992). Finalmente, cabe indicar que un mismo valor de fricción no implica una misma capacidad de dispersión entre un grupo y otro, dada su distinta movilidad. Y, además, no se tienen en cuenta variaciones temporales en los valores de fricción de las distintas coberturas de suelo a lo largo del año.

En lo que respecta a las pendientes, partiendo del MDT se elabora un ráster de pendientes de la misma resolución espacial. A este ráster se le aplica una reclasificación en función de los valores de fricción presentados en la Tabla 3, generándose así 4 nuevos ráster (como en el caso de las rapaces no hay valores a sumar, se prescinde de este proceso para dicho grupo). Sin embargo, pese a que en estudios anteriores se ha incluido el efecto pendiente usándose distintos metodologías y escalas (Zhang y Song, 2020; Zhou y Song, 2021), en este caso se decide usar una escala de 0 a 1000, de acuerdo con las preferencias de cada grupo (Tabla 2). El valor correspondiente a la fricción generada por la pendiente se suma al correspondiente a la superficie para obtener así un valor de fricción final para cada celda. Finalmente, para conseguir el ráster de fricción final, se genera la suma entre ambos ráster, para los valores de fricción de superficies y pendientes de cada grupo faunístico.

Tabla 2. Valores de fricción empleados para las distintas pendientes

Pendientes		*id*	*Mamíferos terrestres forestales*	*Planeadoras*	*Otras rapaces*	*Aves forestales*	*Aves esteparias*
Porcentaje	*Grados*						
<10	<5.71	1	0	100	0	0	0
10-15	5.7-8.5	2	1	50	0	0	0
15-30	8.5-16.7	3	2	25	0	0	500
30-60	16.7-31	4	10	0	0	0	1000
60-173	31-60	5	200	0	0	0	1000
>173	>60	6	1000	0	0	500	1000

Una vez obtenido el ráster con valores de fricción y áreas núcleo, se aplicó el pack de herramientas *Linkage Mapper 2.0.0* (McRae y Kavanagh, 2011) para *ArcGis 10.7.1.* En concreto, se usan las herramientas *Linkage Pathways, Barrier mapper y Pinchpoint Mapper*. Para aplicar esta última herramienta, se instaló el *Circuit Scape 3.5.8*. Se ha optado por usar el *Linkagge mapper* porque ha sido usado de forma recurrente en los últimos años en numerosos estudios (Colyn et al., 2020; Rodríguez et al., 2018; Zhou Song, 2021), y por la amplia variedad de resultados absolutos y relativos que ofrece, obtenidos a partir de herramientas tales como *pinchpoints, barrier mapper y least cost distance*, las cuales se aplicaron ya en Colyn et al. (2020) entre otros.

De todos los resultados obtenidos, se extraen: *Barrier mapper, Normaliced Truncated cost* y *Blended priority* (*Linkage priority*), y *Pinchpoint Mapper*. En todos casos se aplica el ráster de resistencia para cada grupo obtenido, y como áreas núcleo los polígonos (singlepart) de la Red Natura 2000 numerados (Figura 1). Este proceso se lleva a cabo para cada uno de los grupos de animales, tanto para la situación actual, como para la situación posterior a la instalación de los parques eólicos, obteniendo una cartografía para cada especie y otra global para cada uno de los cinco grupos planteados.

Finalmente se obtiene la diferencia entre la situación posterior y la situación actual, para así poder

valorar los cambios globales en los corredores ecológicos que son usados actualmente.

Todos los resultados vienen dados por números decimales positivos que, en el caso de las rutas de menor coste (*NORMTRUNC*) y de los corredores de prioridad combinada (*blended priority*) están normalizados de 0 a 1. Por lo tanto, las áreas de máximo valor para estos dos resultados indicarán las rutas de menor coste y las áreas de los corredores cuya conservación es prioritaria, y por otro lado los valores máximos de cuellos de botella, y las barreras corresponderían a aquellas áreas donde sería necesario actuar para mejorar la conectividad y expandir el corredor. Igualmente, a estos resultados globales se les realiza la diferencia, entre la situación posterior y la situación actual.

Tabla 3. Valores de fricción empleados para las distintas superficies

Superficies	*Mamíferos terrestres forestales*	*Planeadoras*	*Otras rapaces*	*Aves forestales*	*Aves esteparias*
Antrópicas					
Autovías	1000	250	100	1000	750
Carretera convencional	100	100	100	500	100
Paso elevado	50	100	100	500	100
Ferrocarril	100	250	100	500	250
Ferrocarril vallado	700	300	250	600	500
Prados	30	15	15	300	10
Cultivos herbáceos de secano	60	10	10	500	10
Cultivos herbáceos de regadío	60	15	15	600	750
Arrozales	100	20	20	700	1000
Cultivos leñosos	50	100	50	100	1000
Matriz agrícola	55	10	10	150	500
Matriz agrícola con cultivos herbáceos de regadío	55	25	25	400	1000
Asentamientos, granjas, e industria en matriz agrícola	100	50	50	500	1000
Matriz agrícola y natural no arbolada	40	5	5	150	500
Matriz agrícola y natural arbolada	25	8	8	50	750
Zona urbana dispersa	500	250	150	250	1000
Zona urbana	1000	500	300	500	1000
Zonas de extracción o vertido	100	100	100	1000	1000
Láminas de agua, canales y embalses artificiales	1000	10	10	1000	1000
Eólico en funcionamiento	40	250	200	250	250
Aeropuertos	1000	1000	800	1000	750
Red eléctrica media y alta tensión	35	100	100	100	50
Naturales					
Suelo desnudo y zonas de erosión	50	1	1	250	100
Mosaico predomina suelo desnudo	40	1	1	225	25
Afloramientos rocosos y roquedos	40	1	1	150	1000
Mosaico predomina afloramientos rocosos y roquedos	20	1	1	200	1
Pastizal	30	2	2	100	1
Mosaico predomina pastizal	35	3	3	50	100
Matorral	5	5	5	25	25
Mosaico predomina matorral	4	7	7	5	25
Forestal	1	20	20	1	750
Mosaico predomina forestal	2	15	15	30	500
Matriz forestal, matorral y pastizal	8	10	10	500	500
Cursos de agua	100	500	500	500	1000

3. RESULTADOS

3.1. Evaluación resultados Linkage mapper para la situación actual

A continuación, se muestran los resultados de los valores de fricción para la situación actual por grupo de especies (Figura 3). Por otro lado, en la Figura 4 se muestran los resultados globales. Estos resultados se muestran en forma de variable categórica, de manera que para las superficies de fricción el valor mínimo es 1, y el máximo 9. Por otro lado, el valor 1 representa las rutas de menor coste y el máximo valor como corredores prioritarios, y por el contrario implica el máximo valor de barreras y cuello de botella.

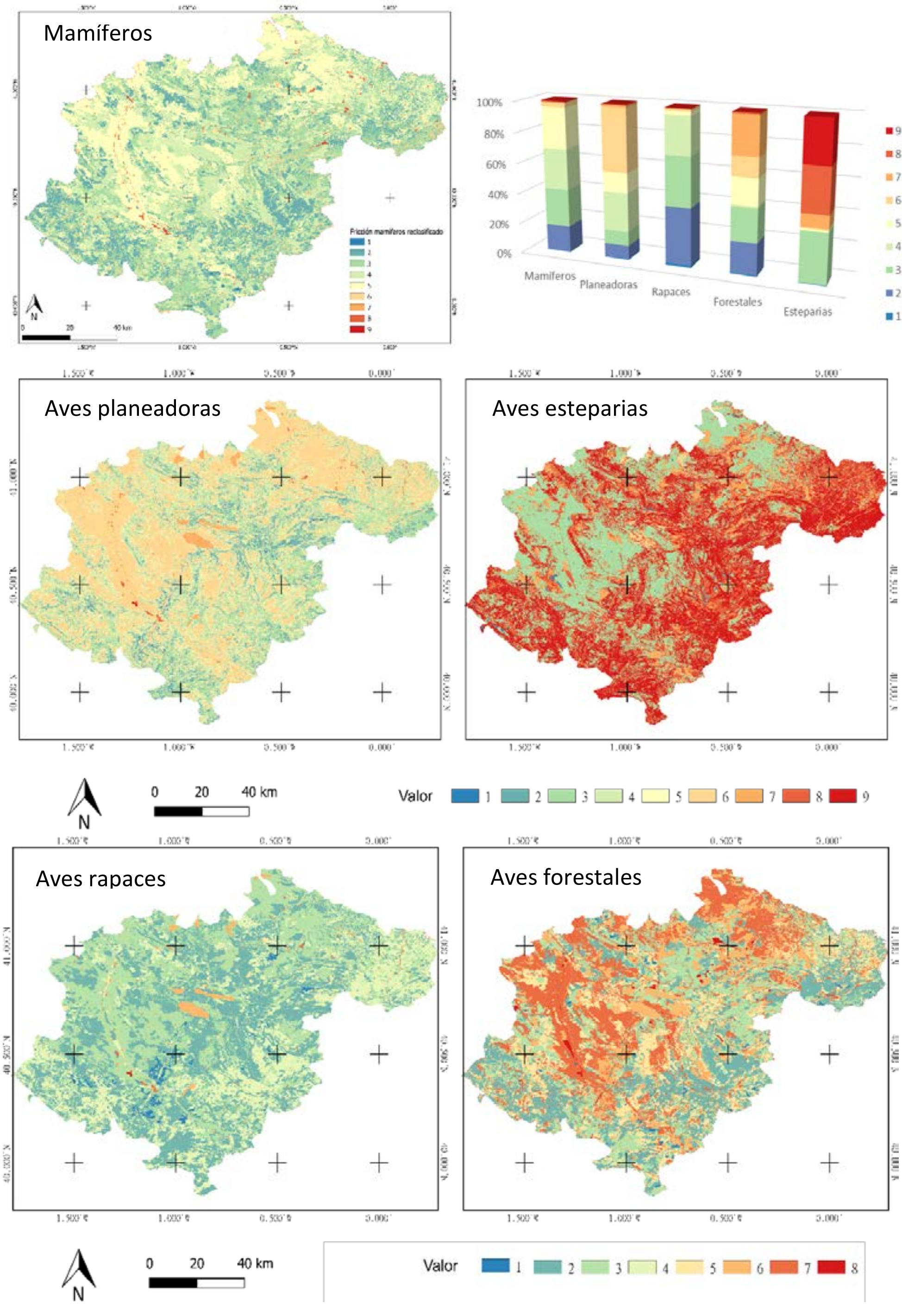


Figura 3. Fricción total por grupos.

En lo que a valor de corredores y valores de menor coste se refiere, las áreas más estrechas que separan la RN del extremo sur, centro y este de la provincia son las que mayor valor tienen para los

"corredores prioritarios". Se observa que las áreas más estrechas que conectan la RN, en el sur y centro de la provincia, son las que tiene más valor para todos los grupos. Por lo general, se observa que los cuellos de botella, que constituyen las áreas más estrechas de los corredores, corresponden a los sotos de ribera, así como otros elementos del espacio como lo son las laderas deforestadas, aunque depende de cada grupo de especies que se esté estudiando. Por último, los resultados de barreras responden a múltiples razones, más allá de infraestructuras viarias de importancia, como el ferrocarril y ciertos tramos de la autovía (Figura 1), por lo que es necesario revisar los resultados para cada grupo de especies.

3.2. Comparativa entre la situación posterior y actual a la instalación de parques eólicos

La diferencia entre la situación posterior y actual se puede apreciar en la Figura 5. Los valores inferiores a 6, implican pérdida de valor de corredor, o aumento de efecto barrera y de cuello de botella y, por el contrario, el valor 7 implica un aumento de valor como corredor, o pérdida de efecto barrera o de cuello de botella. Las celdas sin valor implican que no hay un cambio entre ambas situaciones.

Como se puede observar, en las áreas en las que se ubicarían los parques eólicos proyectados se produce un aumento en el coste de desplazamiento, una disminución del valor del corredor ecológico (áreas negativas de diferencia de menor coste y diferencia del valor corredor ecológico respectivamente), y resultados dispares del efecto barrera.

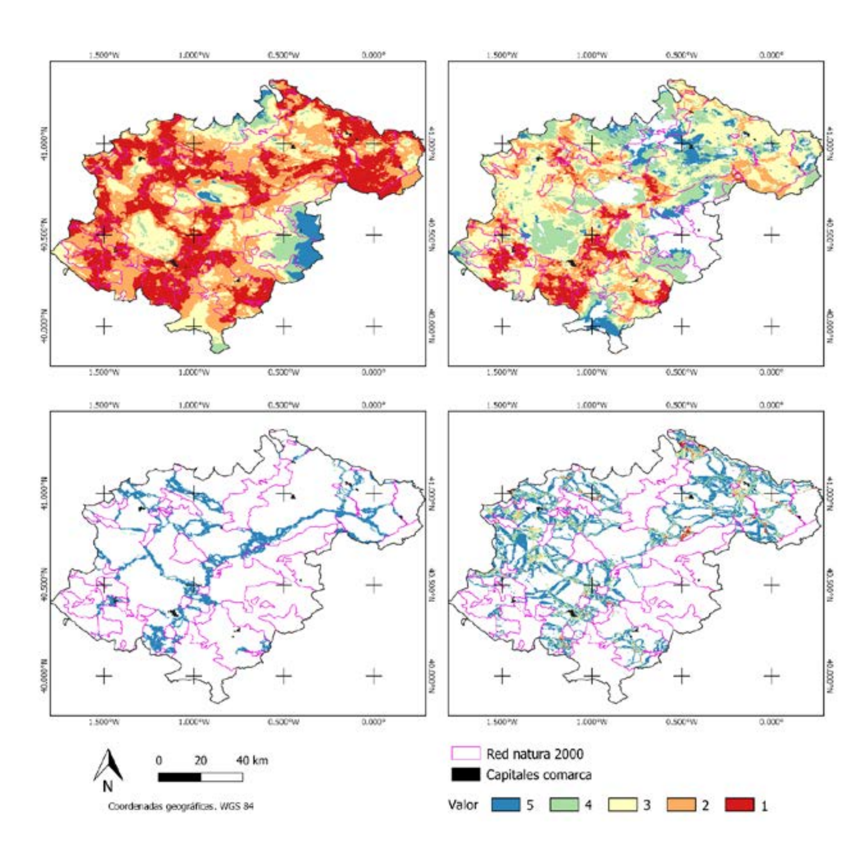


Figura 4. Resultados globales situación actual. Rutas de menor coste (arriba-izquierda), corredores prioritarios (arriba-derecha), cuellos de botella (abajo-izquierda), y barreras (abajo-derecha)

En las áreas situadas alrededor de los parques eólicos proyectados no se producen los efectos descritos anteriormente. En concreto, se produce un aumento de valor como ruta de menor coste y una disminución del valor del corredor en las áreas de menor distancia entre los polígonos de la RN, donde los parques eólicos se ubicarían interfiriendo. En el caso de que estas áreas estén en los laterales de los corredores originales, se produce un aumento del valor en las mismas.

Cuando se trata de cuellos de botella se producen ambos efectos. Por un lado, un aumento en las áreas que constituyen los nuevos corredores, y en aquellos que siguen manteniendo el mismo recorrido original o parecido al atravesar los parques eólicos y, por otro lado, una disminución de los mismos en aquellos lugares en los que el corredor dejaría de existir y también un aumento de las barreras en aquellos lugares donde se

generan nuevos corredores, debido a la amenaza de los parques eólicos; o una disminución de las mismas en aquellos lugares donde los corredores desaparecen.

Las nuevas barreras generadas, o bien corresponden a los nuevos parques eólicos, o bien a distintos elementos, ya presentes en la actualidad, y que funcionarían como barreras en los nuevos corredores. Destacan entre otras: el ferrocarril; la autovía y las amplias extensiones de cultivos herbáceos de secano.

Así pues, a nivel global, se puede ver como los corredores del centro, el extremo oriental, y nororiental son los sectores que mayores resultados negativos presentan, es decir, muestran una pérdida de conectividad. Los corredores de la mitad sur de la provincia tienen pérdida de valor para los mamíferos y aves forestales, pero no lo tienen para el resto de grupos.

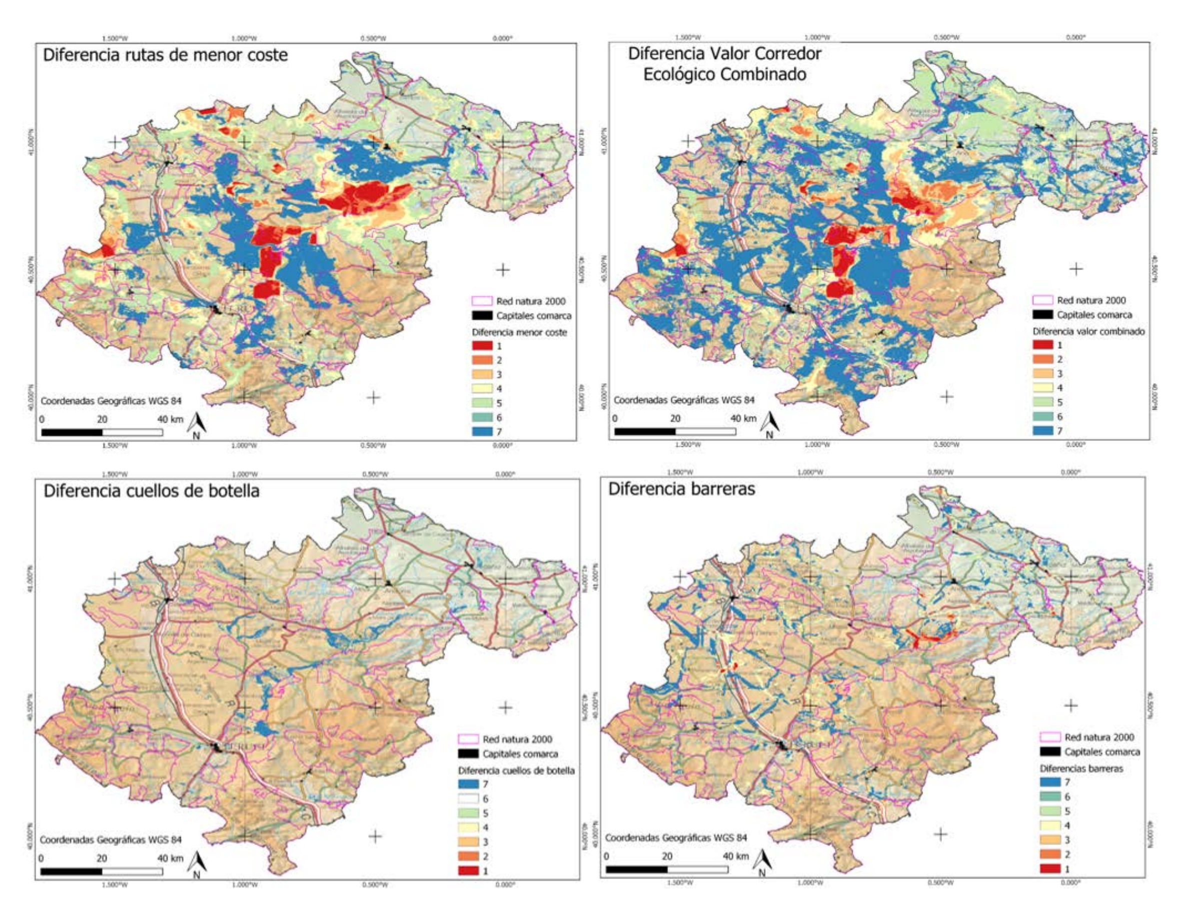


Figura 5. Resultados globales diferencia.

4. DISCUSIÓN

4.1. Situación actual

La situación actual para la provincia de Teruel muestra que la red de espacios de la Red Natura 2000 puede permitir por sí misma la conexión relativamente eficaz para los distintos grupos estudiados. Por supuesto, esta conexión viene a ser diferente según el grupo de estudio, así como los cuellos de botella y barreras.

Los corredores ecológicos en la actualidad constituyen, en general, las áreas más estrechas que separan unos polígonos de otros de la RN, a no ser que entre ellos haya barreras destacables como parques eólicos, grandes superficies de campos de cultivo intensivo e infraestructuras. A estas áreas se suman los bosques de ribera para aves forestales y mamíferos, y las laderas para las planeadoras. Estas áreas, sobre todo los bosques de ribera, y pasos bajos para mamíferos constituyen cuellos de botella sobre los cuáles resultaría beneficioso actuar. También se debe considerarse llevar a cabo estas mismas acciones en las barreras de mayor entidad detectadas.

4.2. Efectos de instalación de parques eólicos

Desde el punto de vista teórico la instalación de nuevos parques eólicos no solo genera efectos

negativos para la conectividad ecológica en el área en el que se ubican, sino también en los alrededores y, si estos polígonos están dispuestos interfiriendo un corredor de cierta importancia, se generan cambios en el mismo, y en la red inmediata. Por ende, de acuerdo con los resultados que muestra *Linkage mapper*, en el momento en que aparecen nuevas “barreras”, tales como estas infraestructuras, pueden surgir dos casuísticas:

- El corredor sigue transcurriendo por el mismo lugar y, por lo tanto, esta área aparece con un aumento del efecto barrera en los resultados, debido al aumento del coste de desplazamiento. Dentro de esta misma área, los animales seleccionarían como corredores aquellas áreas en las que estas barreras estén menos presentes. Si estos corredores no tienen la suficiente amplitud, constituyen cuellos de botella.
- El corredor es desplazado a otra área, de tal manera que ésta gana valor como superficie de menor fricción, de corredor prioritario, y aparecen barreras y cuellos de botella en mayor o menor medida (dependiendo de las particularidades del terreno). Al mismo tiempo, el área que deja de ser corredor pierde valor en los cuatro parámetros: barrera, cuellos de botella, de corredor prioritario, y ruta de mínimo coste.

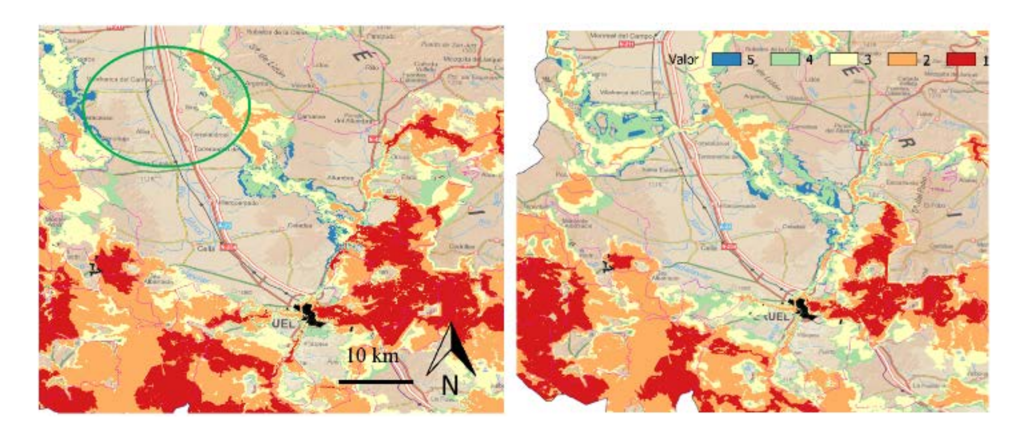


Figura 6. Cambio en la red de corredores para aves forestales (izquierda situación actual, y derecha situación posterior a instalación parques eólicos). Destaca el cambio en el área indicada, donde aparecería un “nuevo” corredor

Atendiendo a los resultados de valor del corredor y barreras, por norma general, los parques eólicos van a suponer una barrera total, obligando a las especies estudiadas a desplazarse de un polígono de la RN a otro por otros entornos, que en la situación previa no eran identificados como corredores (Figura 6).

5. CONCLUSIONES

Se ha podido demostrar desde el punto de vista teórico el efecto que supondría la instalación de nuevas infraestructuras eólicas sobre la conectividad de la Red Natura 2000 en la provincia de Teruel, pues la construcción de estas nuevas plantas de generación de energía renovable, ocasionarían un importante efecto negativo en aquellos lugares que en la actualidad se muestran como buenos corredores ecológicos. Este impacto negativo, puede dar lugar a:

- Un desplazamiento del corredor a los alrededores del parque eólico, obligando a los animales a desplazarse por áreas menos favorables
- El mantenimiento del corredor, ocasionando un mayor coste de desplazamiento.

Según los resultados mostrados con la herramienta *Linkage* mapper, se ha observado que estos efectos pueden ser locales o bien pueden causar un impacto en la red global de corredores, añadiendo nuevos en áreas menos favorables en detrimento de unos corredores previos ubicados en áreas favorables que dejan de serlo.

6. BIBLIOGRAFÍA

Colyn, R. B., Ehlers Smith, D. A., Ehlers Smith, Y. C., Smit-Robinson, H., Downs, C. T. (2020). Predicted distributions of avian specialists: A framework for conservation of endangered forests under future climates. *Diversity and Distributions*, *26*(6), 652–667. https://doi.org/10.1111/ddi.13048

Ersoy, E., Jorgensen, A., Warren, P. H. (2019). Identifying multispecies connectivity corridors and the spatial pattern of the landscape. *Urban Forestry and Urban Greening*, *40*, 308–322. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.08.001

Eycott, A. E., Stewart, G. B., Buyung-Ali, L. M., Bowler, D. E., Watts, K., Pullin, A. S. (2012). A meta-analysis on the impact of different matrix structures on species movement rates. *Landscape Ecology*, *27*, 1263–1278. https://doi.org/10.1007/s10980-012-9781-9

Gurrutxaga, M., Lozano, P. J., del Barrio, G. (2010). GIS-based approach for incorporating the connectivity of ecological networks into regional planning. *Journal for Nature Conservation*, *18*(4), 318–326. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2010.01.005

Gurrutxaga, Mikel, Rubio, L., Saura, S. (2011). Key connectors in protected forest area networks and the impact of highways: A transnational case study from the Cantabrian Range to the Western Alps (SW Europe). *Landscape and Urban Planning*, *101*(4), 310–320. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.036

Gurrutxaga San Vicente, M. (2007). *La conectividad de redes de conservación en la planificación territorial con base ecológica. Fundamentos y aplicaciones en la Comunidad Autónoma del País Vasco* (Issue April).

Gurrutxaga San Vicente, M. (2014). Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología*, 68–84.

Gurrutxaga San Vicente, M., Lozano Valencia, P. J. (2007). Criterios para contemplar la conectividad del paisaje en la planificación territorial y sectorial. *Investigaciones Geográficas*, *44*, 75. https://doi.org/10.14198/ingeo2007.44.04

Knaapen, J. P., Scheffer, M., Harms, B. (1992). Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, *23*(1), 1–16. https://doi.org/10.1016/0169-2046(92)90060-D

McRae, B. H., Kavanagh, D. M. (2011). Linkage mapper connectivity analysis software. In *The Nature Conservancy*.

Pascual Hortal, L., Saura Martínez de Toda, S. (2008). Integración de la conectividad ecológica de los bosques en los instrumentos de planificación forestal a escala comarcal y regional. *Revista Montes*, *94*, 31–37.

Pereira, J., Saura, S., Jordán, F. (2017). Single-node vs. multi-node centrality in landscape graph analysis: key habitat patches and their protection for 20 bird species in NE Spain. *Methods in Ecology and Evolution*, *8*(11), 1458–1467. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12783

Rodríguez, G., Mateo Sánchez, M. C., de la Fuente Martín, B., Gastón González, A., Saura Martínez, S., Gurrutxaga, M. (2018). *Autopistas salvajes*. WWF.

Ruiz-González, A., M, G., Madeira, M. J., Lozano, P. J., Fernández-García, J. M., Gómez-Moliner, B. J. (2010). *Estudio de la conectividad ecológica en la CAPV. Genética del Paisaje aplicada sobre una especie-objetivo de la Red de Corredores Ecológicos: la marta europea (Martes martes)*.

Sastre, P., de Lucio, J. V., Martínez, C. (2002). Modelos de conectividad del paisaje a distintas escalas. Ejemplos de aplicación en la Comunidad de Madrid. *Modelos de Conectividad Del Paisaje a Distintas Escalas. Ejemplos de Aplicación En La Comunidad de Madrid*, *11*(2), 7. https://doi.org/10.7818/re.2014.11-2.00

Zhang, Y., Song, W. (2020). Identify ecological corridors and build potential ecological networks in response to recent land cover changes in Xinjiang, China. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(21), 1–23. https://doi.org/10.3390/su12218960

Zhou, D., Song, W. (2021). Identifying ecological corridors and networks in mountainous areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*. https://doi.org/10.3390/ijerph18094797



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 420-429

Evaluación del nivel de servicio peatonal en Madrid a partir de datos de sensores fijos

R. Talavera-Garcia[1], R. Pérez-Campaña[1]

[1] Departamento de Geografía, Universidad Complutense de Madrid. C. Prof. Aranguren, s/n, 28040 Madrid.

rtalaverag@ucm.es, r.perez.campana@ucm.es

RESUMEN: La pandemia de la COVID ha permitido evidenciar el potencial de las diferentes fuentes de datos masivos geolocalizados para el seguimiento y la toma de decisiones. Los contadores se han implementado tradicionalmente para medir la intensidad de vehículos motorizados. Su uso en la movilidad peatonal y en general en la movilidad activa es todavía muy incipiente y ofrece aún vías de exploración interesantes. En este trabajo se han utilizado los datos recogidos por los contadores (sensores fijos) peatonales del distrito Centro de Madrid y las características de las calles en que se localizan para evaluar cómo cambia el nivel de servicio peatonal al considerar las medidas de distanciamiento social que operaron durante la pandemia. En una situación de normalidad, en la que la distancia interpersonal no está regulada, el nivel de servicio, aun siendo alto en general, disminuye en las calles con mayor densidad comercial en horario de tarde. Sin embargo, en un escenario en el que sea necesario el establecimiento de una determinada distancia interpersonal, el nivel de servicio disminuye por el elevado flujo de peatones, pudiendo tener efectos en la salud y bienestar de la población. Es en estos casos en los que se podrían establecer diferentes actuaciones de urbanismo táctico que permitan gestionar el flujo de peatones en función de las características de la sección viaria, con la ventaja, además, de que se estarían incorporando datos de los contadores en tiempo casi real.

Palabras-clave: movilidad peatonal, nivel de servicio, COVID-19, ciudades inteligentes, urbanismo táctico.

1. INTRODUCCIÓN

Durante los primeros meses tras el inicio de la pandemia, el establecimiento de cuarentenas y el distanciamiento social fueron algunas de las principales medidas para prevenir el contagio (López y Rodó, 2020). Estas medidas conllevaron una reducción de la movilidad que pudo ser observada a todas las escalas (Galeazzi et al., 2021; Romanillos et al., 2021), así como un cambio en los patrones de movilidad diaria (Borkowski et al., 2021). Sin embargo, el impacto en la movilidad no ha sido el mismo en todos los medios de transporte. De hecho, se constató por ejemplo un aumento en el uso de la bicicleta (Buehler y Pucher, 2021), así como del vehículo privado en detrimento del transporte público (Das et al., 2021). También se ha evidenciado la escasez de herramientas de seguimiento y control de la movilidad peatonal. Si bien se han producido avances notables en cuanto al estudio de la movilidad motorizada, no ha sido así con la movilidad activa y en particular la movilidad peatonal. En el contexto de la pandemia de COVID-19, a la falta de dispositivos de adquisición de datos se ha sumado también la incertidumbre sobre la propagación del virus (sobre todo durante los primeros meses). En cuanto a la adquisición de datos, la bibliografía existente muestra que la dinámica de los peatones se analiza principalmente mediante métodos empíricos, análisis visuales y simulaciones (Haghani, 2021), mientras que el uso de datos reales provenientes, por ejemplo, de contadores peatonales, es mucho menor, probablemente también por el hecho de que se trata de tecnologías recientes y todavía con poca implantación. Respecto a la propagación del virus, ésta depende de diferentes variables como el tamaño de los aerosoles (Zhang et al., 2020), la temperatura y la humedad del aire, la fuerza de la respiración y el uso o no de mascarilla. La comunidad científica ha determinado que se produce una mayor dispersión cuando las personas estornudan, tosen y cuando hablan o respiran con más fuerza como consecuencia de caminar o correr (Leung et al., 2020). Al asumirse mayores distancias de dispersión, el distanciamiento social debería ser mayor, en este caso, cuando se trata de personas que caminan por la acera.

Teniendo en cuenta los planteamientos anteriores, el objetivo de este estudio es evaluar el potencial

de los contadores de peatones para supervisar y controlar el distanciamiento social mediante una herramienta sencilla basada en la medida clásica del nivel de servicio peatonal (*Pedestrian Level of Service*, en adelante, PLOS). Se propone el nivel de servicio peatonal en pandemia (*Pandemic-Pedestrian Level of Service*, en adelante, P-PLOS), diseñado para permitir mediciones más realistas de la movilidad de los peatones en situaciones en las que deben cumplirse recomendaciones específicas sobre el distanciamiento interpersonal o social. En concreto este estudio se desarrolla sobre el distrito centro de la ciudad de Madrid, con los siguientes objetivos: (1) Evaluar los efectos del distanciamiento social en los patrones espacio-temporales de la movilidad peatonal usando como fuente la información obtenida de contadores de peatones. (2) Proponer un nivel de servicio peatonal en situaciones de pandemia (en general, en situaciones que impliquen el establecimiento de distancias de seguridad interpersonal) que permita el uso de medidas tácticas de planificación urbana. (3) Evaluar el nivel de servicio peatonal con y sin distanciamiento social, permitiendo realizar una comparativa.

2. ZONA DE ESTUDIO

Se ha utilizado el distrito Centro de Madrid como caso de estudio (Figura 1). Se trata de un distrito caracterizado por su fuerte componente cultural, con gran presencia de turistas nacionales e internacionales, cuyas huellas digitales han sido medidas previamente, por ejemplo, por García-Palomares et al. (2015) y Salas-Olmedo et al. (2018). Este rasgo distintivo se traduce además en un predominio de los locales comerciales (36,8%) y de los hoteles y restaurantes (25,5%) según el censo de comercios de Madrid obtenido de la web de datos abiertos (Ayto. Madrid, 2021). En definitiva, se trata de un distrito con una alta afluencia de peatones en comparación con otras zonas, lo que lo convierte en una zona más propensa a aglomeraciones. Por otra parte, el Ayuntamiento de Madrid genera multitud de datos relacionados con la movilidad (tráfico, bicicletas, peatones, etc.), que pone a disposición del público a través de su web de datos abiertos (https://datos.madrid.es/portal/site/egob) y que han sido fundamentales para este trabajo.

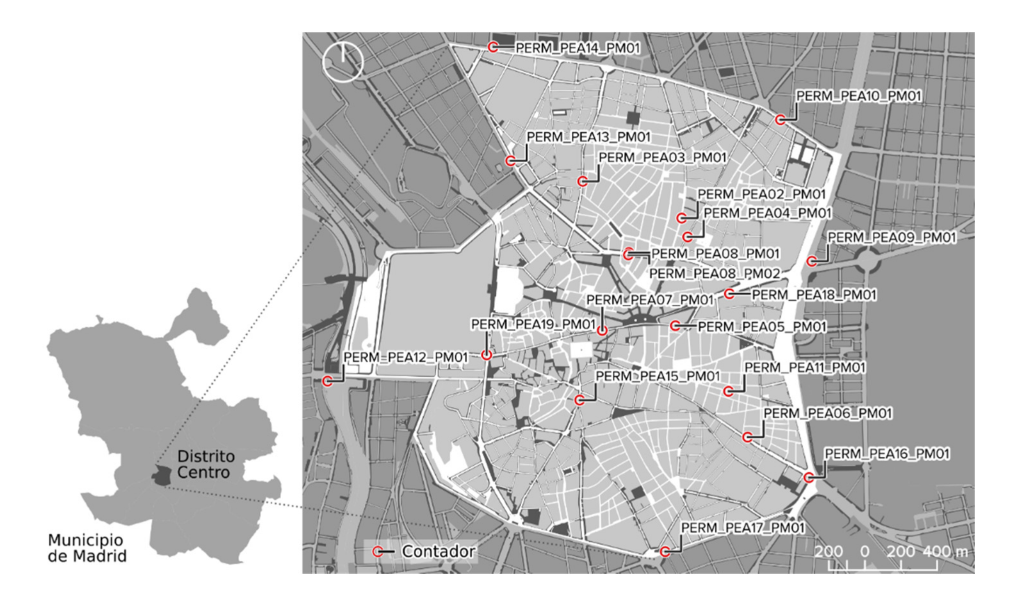


Figura 1. Zona de estudio. Madrid Central.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

La base de datos de contadores de peatones está disponible en la página web de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid e incluye registros desde 2019 para un total de 19 contadores distribuidos por el distrito Centro. Es preciso señalar que los contadores realizan registro de peatones cada 15 minutos en 2019 y cada 60 minutos en 2020 y 2021, cuestión que ha de ser tenida en cuenta en la realización del análisis. También se ha obtenido del Geoportal del Ayuntamiento de Madrid (Ayuntamiento de Madrid, 2021) el callejero con las aceras de la ciudad a escala 1:1000, con última actualización 2016.

Adicionalmente y con el objetivo de comparar posibles tendencias, se han usado datos de movilidad proporcionados por Apple y Google. Los datos de Apple (Apple, 2021) se refieren al número de solicitudes de direcciones por país, región o ciudad, y se compararon con los datos de referencia del 13 de enero de

2020 utilizados en este estudio. En el caso de Google, los datos se han obtenido a partir de los Informes de Movilidad Local sobre COVID-19 (Google, 2021) que incluyen la tendencia de los desplazamientos a lo largo del tiempo a diferentes escalas y clasificados por categorías: tiendas y ocio, supermercados y farmacias, estaciones de transporte público, lugares de trabajo y zonas residenciales.

La metodología propuesta consta de varios pasos. En el primer paso se realiza una preparación de los datos y una caracterización de las calles. Se ha elaborado un script de Python que permite descargar la información en formato de texto (csv) de las webs de Google, Apple y Open Data de Madrid. La descarga de registros de los contadores cubre el periodo comprendido entre septiembre de 2019 y abril de 2021. Por su parte, los ficheros de texto en formato csv de Apple y Google fueron filtrados por la librería Python Pandas para obtener la información de Madrid, y se homogeneizó el formato para poder compararlo. La superficie de las aceras se ha calculado según la información proporcionada por el Ayuntamiento de Madrid, actualizando los datos de las aceras cuyo ancho se ha ampliado después de la fecha de publicación. Una vez actualizada la geometría de las calles, se ha obtenido su anchura en el punto en el que se encontraba el contador.

En el segundo paso se analizan los cambios en los patrones espacio temporales de la movilidad peatonal. Para ello se utilizaron dos periodos temporales. Primero, de enero de 2020 a abril de 2021, usando datos de los contadores, así como de Google y Apple, se analizaron los patrones temporales a nivel general. En un segundo periodo se incluyó el tercer cuatrimestre de los años 2019 y 2020, realizándose un análisis más detallado y permitiendo establecer una comparativa entre la situación antes y después del inicio de la pandemia. Además, se analizan los patrones de movilidad peatonal en términos espaciales mediante un uso desagregado de los datos de los contadores, pudiendo determinar el impacto en la movilidad en relación con las características de las calles en las que se encuentran los contadores.

En el tercer paso de la investigación se diseña el nivel de servicio peatonal en pandemia, teniendo en cuenta las recomendaciones de las autoridades sanitarias y la evidencia científica. Las variables del escenario peatonal se establecen basándose en una distancia lateral de 1,5 m. De acuerdo con el trabajo de Blocken et al. (2020) la distancia de seguridad para el caso de transmisión de aerosoles depende de la velocidad al caminar. En este trabajo se ha considerado una velocidad al caminar de 4 km/h y una distancia mínima de seguridad de 5 m (Figura 2).

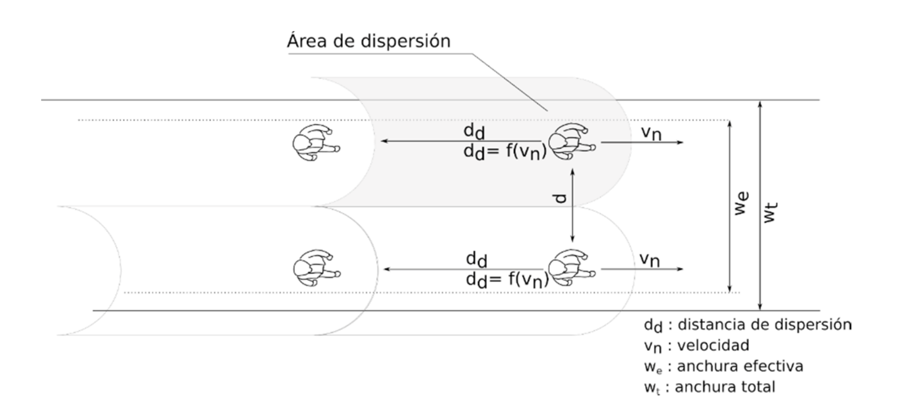


Figura 2. Características del escenario peatonal considerando distancia social.

Empleando las mediciones anteriores, se calcula el área peatonal de dispersión A_d:

$$A_d = D_d f(v) * LD_d \quad (1)$$

donde:

A_d es el área peatonal de dispersión;
$D_d f(v)$ es la distancia peatonal de dispersión basada en la velocidad;
LD_d es la distancia peatonal de dispersión lateral.

Siguiendo esta fórmula, el área de dispersión con una velocidad de 4 km/h es de 7,5 m^2 (5 m de distancia*1,5 m de distancia lateral)

De esta forma, los valores correspondientes al nivel de servicio peatonal se recalculan (Tabla 2) basándose en la herramienta original del nivel de servicio peatonal facilitada en el *Highway Capacity Manual (HCM) 2000* (Reilly, 1997) de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$V_p = \frac{S_{pr}}{A_p} \quad (2)$$

donde:

V_p es el flujo peatonal (peatones/min/m);
S_{pr} es la velocidad peatonal de referencia (m/min);
A_p espacio para el peatón (m^2/p).

Tabla 2. Información relativa a los contadores peatonales y su localización

	NIVEL DE SERVICIO PEATONAL (HCM, 2000)			*NIVEL DE SERVICIO PEATONAL EN PANDEMIA*		
Nivel de servicio	*Espacio para el peatón (m^2/p)*	*Flujo (p/min/m)*	*Velocidad (m/min)*	*Espacio para el peatón (m^2/p)*	*Flujo (p/min/m)*	*Velocidad (m/min)*
A	>5,6	<16,40	>77,72	>8,8	<7,6	>83,3
B	5,6–3,7	16,40–22,97	77,72– 76,26	8,8–8,2	7,6–8,1	83,3–75,0
C	3,7–2,2	22,97–32,81	76,26– 73,15	8,2–7,5	8,1–8,9	75,0–66,7
D	2,2–1,4	32,81– 49,21	73,15–68,58	7,5–6,8	8,9–9,8	66,7–58,3
E	1,4–0,75	49,21–75,46	68,58– 45,72	6,8–5,5	9,8–12,1	58,3–41,67
F	<0,75	>75,46	<45,72	<5,5	>12,1	<41,67

Hay que señalar que la anchura de la acera para medir el flujo de peatones sólo tiene en cuenta la anchura efectiva de la acera (la anchura teniendo en cuenta la posible presencia de obstáculos de cualquier tipo, fundamentalmente mobiliario urbano), considerando que esta supone el 55% de la anchura total, siguiendo la investigación realizada por Córdoba-Hernández et al. (2020).

4. RESULTADOS

El efecto de la pandemia COVID-19 sobre la movilidad de los peatones en Madrid (Figura 3) muestra cómo las medidas de confinamiento de la primera ola de la pandemia (marzo de 2020) provocaron un rápido descenso (94% respecto al día de referencia) del número de peatones registrado por los contadores. Estas cifras se mantuvieron hasta el mes de mayo, cuando se suavizaron las medidas, permitiendo a la población caminar al aire libre. El número de peatones registrado aumentó hasta los meses de verano (julio y agosto), momento en que la población dejaba Madrid temporalmente por vacaciones y no hubo apenas llegadas de visitantes extranjeros. Con la vuelta de vacaciones y el inicio del curso escolar, se produjo un ligero aumento del número de peatones, que se mantuvo, salvo algunas semanas, hasta finales de 2020. Los datos registrados para el primer trimestre de 2021 se mantuvieron estables respecto al número de peatones registrados.

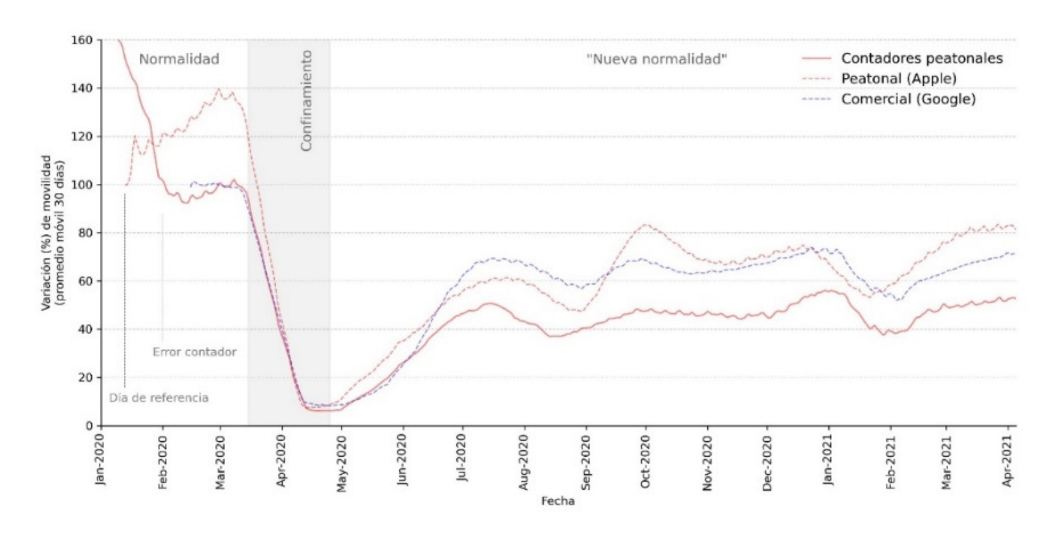


Figura 3. Variación porcentual en el número de peatones.

Al comparar los datos registrados por los contadores con los datos proporcionados por Apple, se puede observar un patrón similar. Sin embargo, existen ciertas diferencias en algunos periodos de tiempo debido a los ámbitos espaciales de los muestreos. En el caso de Apple, los datos abarcan toda la ciudad de Madrid, mientras que los contadores se sitúan únicamente en el distrito Centro, por lo que pueden registrar un nivel de movilidad peatonal menor.

La comparación entre los terceros trimestres de 2019 y 2020 muestra patrones muy similares respecto a la distribución de los peatones a lo largo de la semana (Figura 4a), mostrando picos durante los sábados.

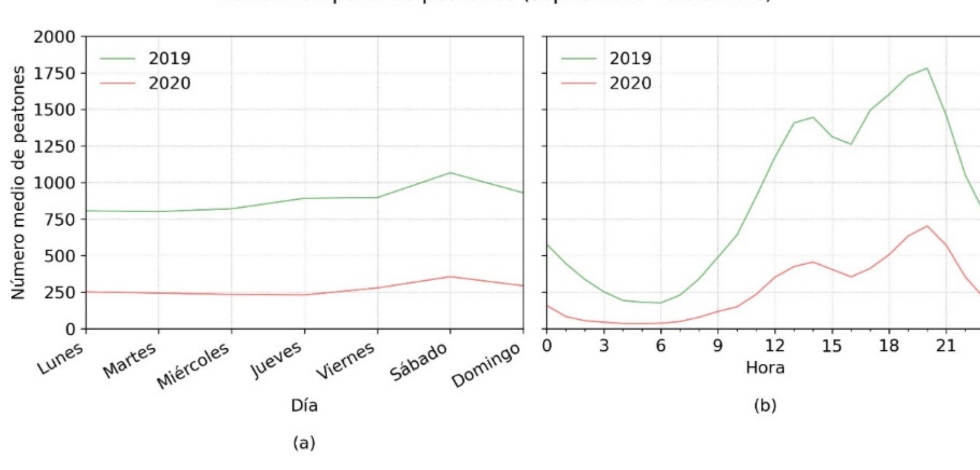


Figura 4. Patrones temporales. (a) Día de la semana, (b) hora.

En cuanto a la distribución de los peatones en las diferentes horas del día (Figura 4b), y teniendo en cuenta la importante reducción del número de peatones, la distribución temporal se mantuvo igual, con un pico entre las 13.00 y las 14.00 h, y un segundo pico con mayor número de peatones a las 20.00 h.

Las medidas y recomendaciones sobre movilidad han tenido un impacto diferente según las características de la calle. El número de peatones registrados por cada uno de los contadores ha disminuido considerablemente, a excepción del contador PEA15 que ha registrado valores similares en los periodos analizados. Cabe destacar que el contador PEA02, a pesar de mostrar la mayor caída en el número medio de peatones, registró valores en 2020 por encima de los 1000 peatones/hora.

Observando con más detalle la distribución temporal por contador de peatones (Figura 5), se aprecian claras diferencias en el número de peatones que pasan por los distintos contadores. Estas diferencias

son claras para 2019 y aún más para 2020. En ambos años, tres contadores concretos registraron el mayor número de peatones: PEA02-PM01, seguido de PEA08-PM01 y PEA08-PM02.

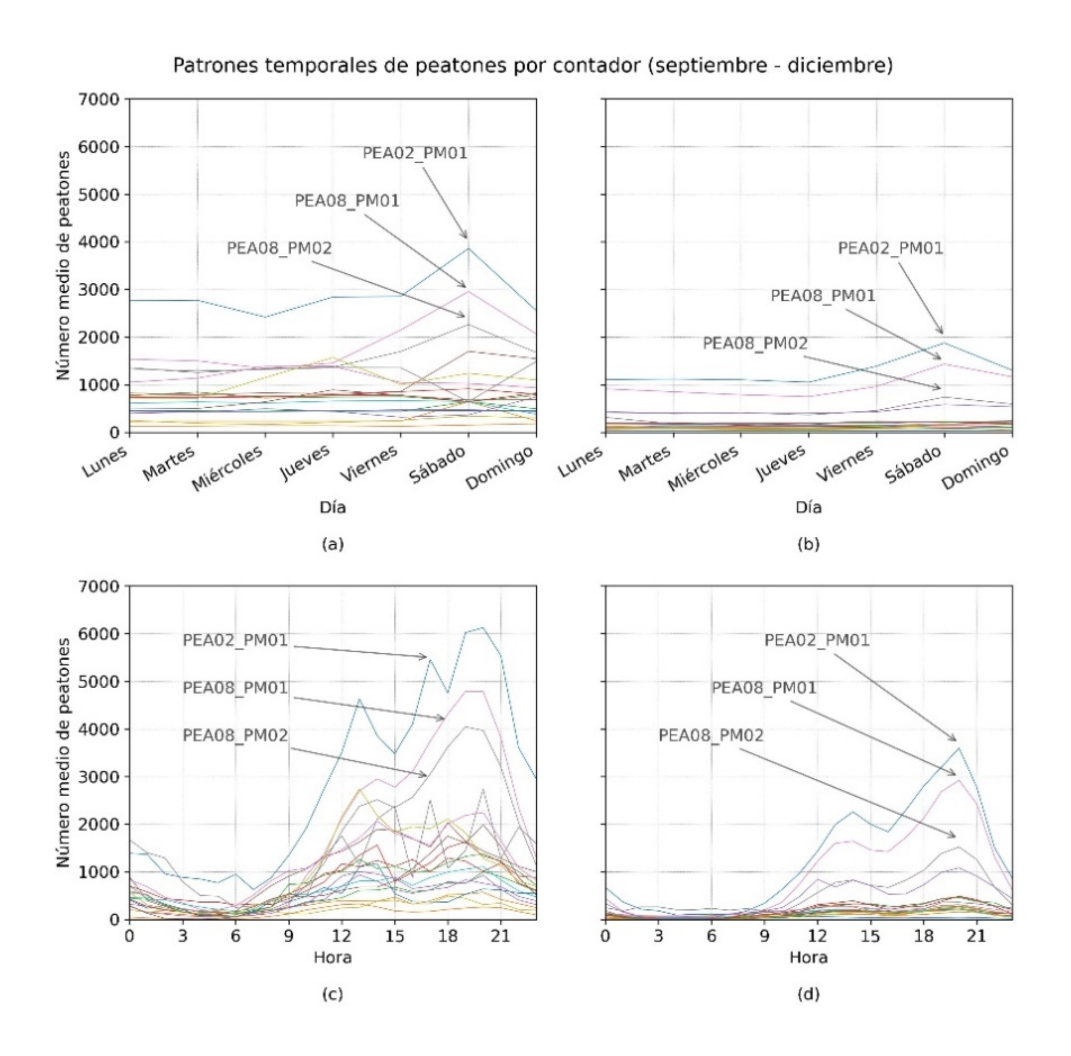


Figura 5. Patrones temporales según contador. (a) Día de la semana 2019, (b) Día de la semana 2020, (c) Hora del día 2019, (d) Hora del día 2020.

Por su parte, los resultados de la aplicación de los niveles de servicio con los datos recogidos (Figura 6) muestran cómo para un escenario de normalidad los valores medios del nivel de servicio peatonal (PLOS) para el periodo analizado se situaron en niveles óptimos (Nivel A) sólo para los contadores PEA02-PM01 y PEA08-PM01 en determinadas horas del día. Por su parte, el PEA08-PM01 registró un descenso del nivel de servicio entre las 17:00 h y las 21:00 h.

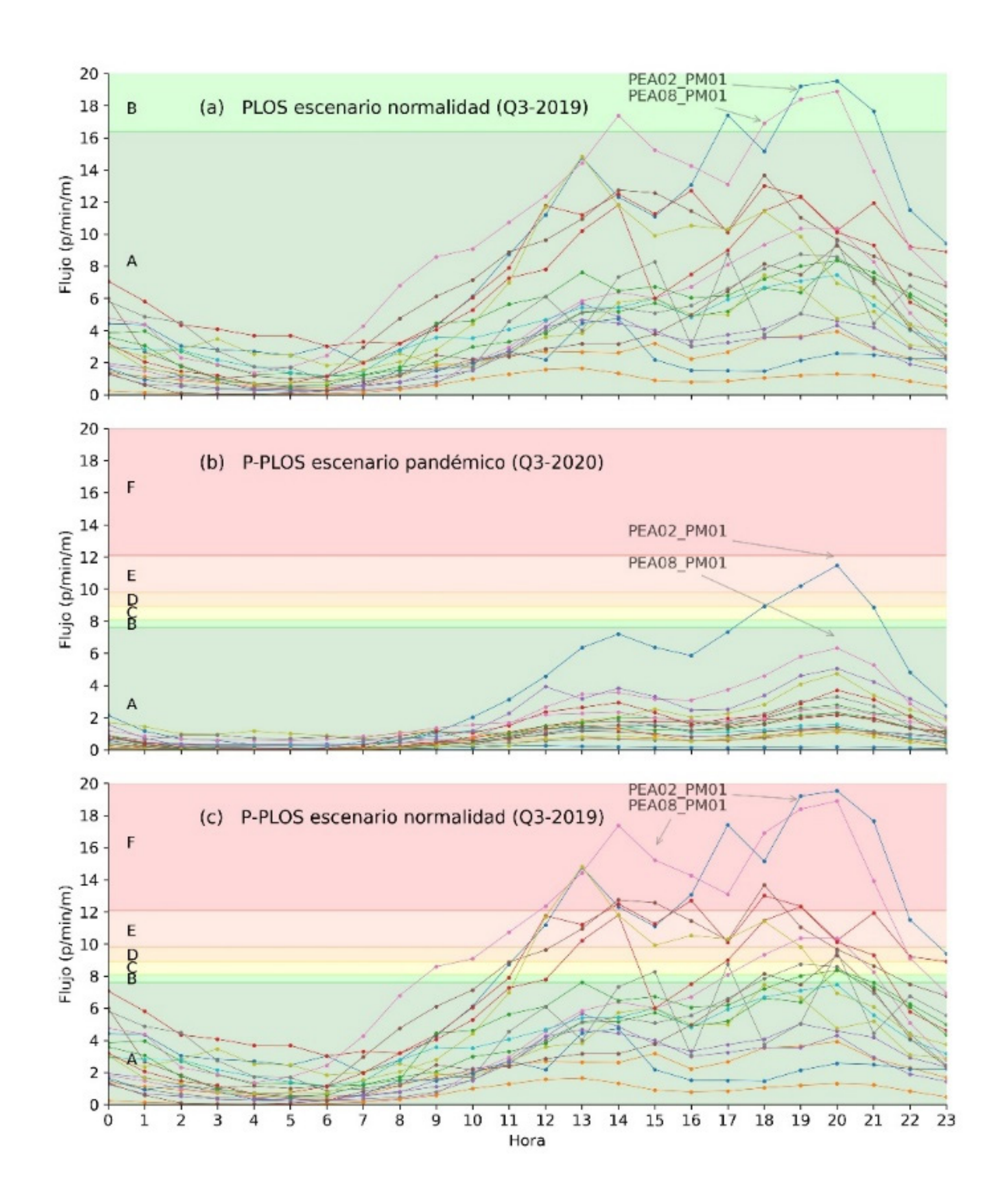


Figura 6. Comparación de los niveles de servicio peatonal en escenario de normalidad (a), P-PLOS en escenario en pandemia (b), y P-PLOS en escenario de normalidad (c).

En general, existe una gran homogeneidad en los niveles de servicio en 2020, para los que los picos de movilidad se produjeron en las horas habituales (de 13:00 a 15:00 h y de 18:00 a 21:00 h). Esta homogeneidad no se reflejó en el contador PEA02-PM01, que registró el mayor número de peatones y dio lugar a niveles de servicio bajos (D, E).

Por último, conviene analizar los resultados del escenario de normalidad desde la perspectiva del nivel de servicio en pandemia (Figura 6c). En este escenario se observa cómo los contadores PEA02-PM01 y PEA08-PM01, situados en las calles Fuencarral y Gran Vía, respectivamente, se encontraban en el nivel de servicio F, que se asocia a flujos peatonales en los que es difícil mantener la distancia de seguridad.

5. DISCUSIÓN

La pandemia ha tenido un gran impacto en la movilidad, tanto a través de un cambio en los patrones de movilidad (Borkowski et al., 2021) y en la actitud de los ciudadanos (Awad-Núñez et al., 2021) y ha puesto a prueba los sistemas de transporte, mostrando sus debilidades y fortalezas. La movilidad peatonal ha sido probablemente la más afectada, y está claro que los niveles de servicio para peatones que tanto se han utilizado en el análisis de la movilidad peatonal no pueden aplicarse directamente en situaciones de distan-

ciamiento social. Son dos los principales retos a los que hay que hacer frente: la necesidad de considerar un escenario dinámico (peatones en movimiento) que tenga en cuenta, en este caso, la propagación del virus; y la necesidad de disponer de datos de recuento de peatones, preferiblemente reales y en tiempo real o cuasi-real. En este contexto, hemos propuesto el nivel de servicio peatonal en pandemia (P-PLOS), mediante el que se realiza un ajuste de los niveles de servicio considerando situaciones con distanciamiento social. La ciudad de Madrid ha comenzado a publicar recientemente los datos de estos contadores (septiembre de 2019) y de hecho, no hay todavía trabajos que incorporen estos datos. Los resultados obtenidos muestran que las medidas de restricción de la movilidad han sido útiles para evitar aglomeraciones, aumentando la movilidad peatonal conforme se fueron relajando las medidas. Sin embargo, esta recuperación de la movilidad peatonal no fue homogénea. En las calles más comerciales la recuperación fue mayor debido a su atractivo para los peatones (Talavera-García y Valenzuela-Montes, 2018), mientras que, en las calles sin usos comerciales, la presencia de peatones se ha mantenido baja. Al mismo tiempo, las medidas tomadas en Madrid para restringir la movilidad nocturna tuvieron un efecto sobre la presencia de peatones en las primeras horas, pero no representó una modificación en el patrón temporal. Sin embargo, más allá de la menor presencia de peatones en las calles analizadas, es necesario analizar esta presencia en términos de nivel de servicio peatonal, teniendo en cuenta la distancia de seguridad recomendada.

Desde la perspectiva del nivel de servicio peatonal durante la pandemia, se observa que las calles con una importante actividad comercial, como Fuencarral y Gran Vía, presentan niveles de servicio bajos (E) o muy bajos (F), sobre todo por la tarde. Estos bajos niveles de servicio se dan también en las fechas más próximas a navidad (aglomeraciones derivadas de las compras en esta época). En estas horas punta, con gran afluencia de peatones, las distancias y la velocidad se vieron afectadas, aumentando el riesgo de no mantener la distancia de seguridad. Es en estas situaciones en las que el nivel de servicio disminuye, cuando el urbanismo táctico puede desempeñar un papel decisivo, permitiendo actuar en función de las características de la calle para permitir que una mayor proporción de la acera sea utilizada por los peatones (Combs y Pardo, 2021; Rojas-Rueda y Morales-Zamora, 2021).

Esta investigación también pone de manifiesto la utilidad de la introducción de sensores en las ciudades, ya que permiten monitorizar, en tiempo real o cuasi-real, una serie de aspectos de la ciudad, desde la calidad del aire hasta la movilidad, como en el caso que investigamos. Estos sensores, que generan una gran cantidad de datos, pueden ser muy útiles para la toma de decisiones y la gestión de la movilidad en diversas circunstancias. Esta herramienta permite una gestión activa de la movilidad de los peatones, manteniendo las distancias recomendadas por las autoridades sanitarias, y proporcionando información adecuada para tomar medidas tácticas en determinadas calles y en momentos concretos de la semana o del día.

Entre las principales limitaciones de este estudio están los niveles de desagregación de los datos de las diferentes fuentes. En el caso de Apple y Google, existía una limitación de escala que impedía conocer los cambios en la movilidad por distrito o zona censal, así como el hecho de que el intervalo entre las recogidas de datos era de un día. Con respecto a los contadores de peatones, existe una limitación en el intervalo de muestreo, que pasó de 15 min (nivel recomendado) a intervalos de 1 h. También hay que tener en cuenta que los sensores están situados en el distrito Centro. Por lo tanto, no se dispone de información sobre otros distritos de la ciudad para tomar las medidas oportunas. En cualquier caso, es precisamente el distrito centro donde se producen los mayores flujos de peatones de la ciudad de Madrid (Consorcio Regional de Transportes de Madrid, 2021), por lo que es una zona estratégica para el seguimiento de posibles situaciones de riesgo. La ausencia de información sociodemográfica de los peatones también podría considerarse una limitación. Por supuesto, esta información sería útil para una mejor caracterización del flujo de peatones, por ejemplo, para ajustar las velocidades de marcha e incluso para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los peatones. Sin embargo, creemos que el P-PLOS puede permitir un seguimiento eficaz del flujo de peatones y ser la base de otros análisis y aplicaciones.

Por último, conviene aclarar que en este estudio se ha utilizado la distancia recomendada por las autoridades españolas como distancia de seguridad. Sin embargo, la medición del nivel de servicio peatonal en tiempos de pandemia puede ser fácilmente modificada para adaptarla a los requerimientos de las autoridades sanitarias de otros países y regiones o bien utilizarse en cualquier situación en la que haya que mantener una cierta distancia de seguridad.

6. CONCLUSIONES

Las medidas de distanciamiento social han tenido un notable impacto en la movilidad. Este artículo

propone una adaptación de la medida del nivel de servicio peatonal que denominamos nivel de servicio peatonal en pandemia (P-PLOS), para incorporar las recomendaciones sobre los niveles de distanciamiento interpersonal. Los datos para el cálculo se obtienen a partir de contadores de peatones y permiten evaluar el nivel de servicio de un segmento de una calle y, por tanto, valorar en tiempo real o cuasi-real si existen situaciones de riesgo potencial cuando se reduce la distancia interpersonal. Los resultados de P-PLOS pueden ayudar al desarrollo de políticas de salud y movilidad activa, al proporcionar información sobre la necesidad de intervenciones de urbanismo táctico en los lugares y momentos en que los niveles de servicio son más deficientes.

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i NEWGEOMOB (PID2020-116656RB-I00), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/.

7. BIBLIOGRAFÍA

Apple. (2021). COVID-19 – Mobility Trends Reports. Apple. Recuperado 14 de julio de 2021, de https://www.apple.com/covid19/mobility

Awad-Núñez, S., Julio, R., Gomez, J., Moya-Gómez, B., y González, J. S. (2021). Post-COVID-19 travel behaviour patterns: Impact on the willingness to pay of users of public transport and shared mobility services in Spain. European Transport Research Review, 13(1), 20. https://doi.org/10.1186/s12544-021-00476-4

Ayto. Madrid. (2021). Portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid. Recuperado 14 de julio de 2021, de https://datos.madrid.es/portal/site/egob

Ayuntamiento de Madrid. (2021). Geoportal del Ayuntamiento de Madrid. Blog GeoPortal. Recuperado 22 de julio de 2021, de https://wpgeoportal.madrid.es/

Blocken, B., Malizia, F., van Druenen, T., y Marchal, T. (2020). Towards aerodynamically equivalent COVID19 1.5 m social distancing for walking and running. 12.

Borkowski, P., Jażdżewska-Gutta, M., y Szmelter-Jarosz, A. (2021). Lockdowned: Everyday mobility changes in response to COVID-19. Journal of Transport Geography, 90, 102906. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102906

Buehler, R., y Pucher, J. (2021). COVID-19 Impacts on Cycling, 2019–2020. Transport Reviews, 41(4), 393-400. https://doi.org/10.1080/01441647.2021.1914900

Combs, T. S., y Pardo, C. F. (2021). Shifting Streets COVID-19 Mobility Data: Findings from a global dataset and a research agenda for transport planning and policy Shifting streets COVID-19 mobility data. https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100322

Consorcio Regional de Transportes de Madrid. (2021). Encuesta de movilidad de la Comunidad de Madrid 2018. Documento síntesis. Recuperado 14 de septiembre de 2021, de https://www.crtm.es/media/712934/edm18_sintesis.pdf

Córdoba-Hernández, R., Fernández-Ramírez, C., Hernández-Aja, A., Salgado, G. S.-T., y Gómez-Giménez, J. M. (2020). Áreas Urbanas frente a Barrios. Análisis de las características urbanas ante el reto de la ciudad post-COVID19: El caso de Madrid. Ciudad y Territorio Estudios Territoriales (CyTET), 665-684. https://doi.org/10.37230/CyTET.2020.205.13.2

Das, S., Boruah, A., Banerjee, A., Raoniar, R., Nama, S., y Maurya, A. K. (2021). Impact of COVID-19: A radical modal shift from public to private transport mode. Transport Policy, 109, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.05.005

Galeazzi, A., Cinelli, M., Bonaccorsi, G., Pierri, F., Schmidt, A. L., Scala, A., Pammolli, F., y Quattrociocchi, W. (2021). Human mobility in response to COVID-19 in France, Italy and UK. Scientific Reports, 11(1), 13141. https://doi.org/10.1038/s41598-021-92399-2

García-Palomares, J. C., Gutiérrez, J., y Mínguez, C. (2015). Identification of tourist hot spots based on social networks: A comparative analysis of European metropolises using photo-sharing services and GIS. Applied Geography, 63, 408-417. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.08.002

Google. (2021). COVID-19 Community Mobility Report. COVID-19 Community Mobility Report. Recuperado 14 de julio de 2021, de https://www.google.com/covid19/mobility?hl=en

Haghani, M. (2021). The knowledge domain of crowd dynamics: Anatomy of the field, pioneering studies, temporal trends, influential entities and outside-domain impact. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 580, 126145. https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126145

Leung, N. H. L., Chu, D. K. W., Shiu, E. Y. C., Chan, K.-H., McDevitt, J. J., Hau, B. J. P., Yen, H.-L., Li, Y., Ip, D. K. M., Peiris, J. S. M., Seto, W.-H., Leung, G. M., Milton, D. K., y Cowling, B. J. (2020). Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of face masks. Nature Medicine, 26(5), 676-680. https://doi.org/10.1038/s41591-020-0843-2

López, L., y Rodó, X. (2020). The end of social confinement and COVID-19 re-emergence risk. Nature Human Behaviour, 4(7), 746-755. https://doi.org/10.1038/s41562-020-0908-8

Reilly, W. (1997). Highway capacity manual 2000. TR News, 193. https://trid.trb.org/view/475202

Rojas-Rueda, D., y Morales-Zamora, E. (2021). Built Environment, Transport, and COVID-19: A Review. Current Environmental Health Reports, 8(2), 138-145. https://doi.org/10.1007/s40572-021-00307-7

Romanillos, G., García-Palomares, J. C., Moya-Gómez, B., Gutiérrez, J., Torres, J., López, M., Cantú-Ros, O. G., y Herranz, R. (2021). The city turned off: Urban dynamics during the COVID-19 pandemic based on mobile phone data. Applied Geography, 134, 102524. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102524

Salas-Olmedo, M. H., Moya-Gómez, B., García-Palomares, J. C., y Gutiérrez, J. (2018). Tourists' digital footprint in cities: Comparing Big Data sources. Tourism Management, 66, 13-25. https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.11.001

Talavera-García, R., y Valenzuela-Montes, L. M. (2018). Aproximación a los entornos peatonales a través de una encuesta a la población: Aplicación a la ciudad de Granada. Anales de Geografía de la Universidad Complutense, 38(1), 239-262. https://doi.org/10.5209/AGUC.60475

Zhang, R., Li, Y., Zhang, A. L., Wang, Y., y Molina, M. J. (2020). Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(26), 14857-14863. https://doi.org/10.1073/pnas.2009637117

APLICACIONES Y DESARROLLOS BASADOS EN TIG (SIG, TELEDETECCIÓN, CARTOGRAFÍA Y OTRAS GEOTECNOLOGÍAS)

TIG y análisis socioeconómico: variables sociodemográficas y económicas, urbanismo, ordenación del territorio, geomarketing, location intelligence, Internet de las cosas (IoT)…



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 431-440

SIGs como herramientas para localizar la pobreza hídrica

R. Abad Coloma

Instituto Interuniversitario de Geografía, Universidad de Alicante.

ricardo.abad@ua.es

RESUMEN: Tras la crisis de 2008 y el consecuente empobrecimiento de millones de hogares en países desarrollados, un fenómeno hasta entonces marginal se expandió con rapidez, la pobreza hídrica. Esta misma, consistente en la dificultad de hacer frente a los recibos del agua y siendo una cuestión de asequibilidad, se presenta de forma difusa en el espacio urbano al afectar hogares muy diversos. Esta dispersión espacial dificulta no solo el análisis o gestión, sino directamente la visibilidad del problema. La presente investigación tiene como objeto dotar al fenómeno de dimensión espacial analizando la vulnerabilidad urbana frente a la pobreza hídrica, gracias al empleo de Sistemas de Información Geográfica, tras la determinación de una serie de indicadores procedentes de datos de organismos públicos como el INE y generando un método replicable y actualizable con cada Censo. El empleo de SIGs, además de dotar de dimensión espacial a esta vulnerabilidad, también permitiría el análisis espacial de la misma, pero también de los resultados de los indicadores, identificando interrelaciones entre ellos que contribuyan a incrementar dicha vulnerabilidad. Una información que permitiría gestionar integradamente el problema, tanto por parte de instituciones gubernamentales de considerarlo, como del tercer sector, dado el libre acceso de los datos y SIGs de *open access*.

Palabras-clave: pobreza hídrica, vulnerabilidad, indicadores, análisis espacial.

1. INTRODUCCIÓN

La pobreza hídrica en origen era conceptualizada como la ausencia o dificultad de acceso a recursos hídricos, siendo un fenómeno circunscrito a países subdesarrollados o en vías de desarrollo. Por ello, la producción científica trataba principalmente la cuestión de la escasez hídrica. Investigadores como Sullivan (2002), que trató de crear un índice para medir la pobreza hídrica a nivel nacional en países subdesarrollados, o Molle et al (2003) que también analizaron datos gubernamentales de estas regiones, no trascienden la cuestión de la escasez hídrica, y de infraestructuras. No es hasta evidenciarse los efectos de la crisis de 2008 cuando surge como tal la pobreza hídrica, esta vez no se localiza en países subdesarrollados, sino en los países considerados ricos. En ellos, el desempleo conllevó el empobrecimiento de numerosos hogares, surgiendo la pobreza hídrica al tener dificultades para pagar los recibos del agua. Esta nueva realidad supuso que el concepto de pobreza hídrica se diferenciase del de escasez hídrica. Ya no se trata de una situación de falta de agua o infraestructuras, sino de pobreza económica de los hogares.

Aunque la pobreza hídrica se trata de un fenómeno reciente, diversos investigadores han comenzado a estudiarlo, siendo pioneros trabajos como el de Bradshaw et al. (2013), que la analizaron en Inglaterra y Gales. Y emplearon un valor que actualmente se toma como referencia para medir la pobreza hídrica, destinar más del 3% de los ingresos anuales del hogar al pago de recibos del agua. En España, son pioneras las investigaciones de Yoon (2017) centradas en la respuesta social y politización del problema, y las de Morote et al. (2018), analizando la distribución y peso de los consumos domésticos irregulares en Alicante. En esta investigación, se aprecia uno de los principales problemas de la pobreza hídrica, la dificultad de localizarla en el espacio urbano. Se trata de un fenómeno disperso y con facilidad se enmascara al analizarse datos a escalas superiores a la inframunicipal. Ello también es debido a que con la crisis de 2008 se vieron afectados hogares de toda condición socioeconómica, no solo los de menores niveles de renta. Una situación similar puede haberse dado con la pandemia de 2019, que supuso el descenso general de ingresos y la afectación a un amplio número de colectivos. Entre los casos más extremos, justamente se encontraban las profesiones temporales y precarias (por ejemplo, turismo, hostelería, venta ambulante…), no pudiendo trabajar durante meses (Lorente, 2020). Esta realidad evidencia un fenómeno que, aunque se inició a con-

secuencia de una crisis ya superada (2008), no solo no ha desaparecido, sino que, al encadenarse con los efectos de una pandemia, desempleo y precariedad, posterior subida de precios de alimentos, materias primas y combustibles, y coyunturas como la guerra en Ucrania, vaticinan un incremento del número de hogares en esta situación de pobreza extrema. Por ello mismo, el estudio de la pobreza hídrica resulta una temática actual y de gran interés de análisis, siendo la disciplina geográfica y el uso de Sistemas de Información Geográfica fundamentales para analizar y gestionar un fenómeno en origen disperso en el espacio urbano.

La investigación se articula de la siguiente forma. Tras la introducción al fenómeno de la pobreza hídrica, se exponen las hipótesis de partida, objetivos y metodología empleada. Seguidamente a este punto, se exponen los resultados de la investigación, para finalizar con un último punto en que se recogen las conclusiones de la misma.

2. HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

A partir de la relación entre la crisis económica, su repercusión en los hogares y el incremento de la pobreza (entre ellas hídrica), así como al ser la ciencia geográfica una disciplina con un marcado carácter de análisis espacial, se planteó la siguiente hipótesis: La pobreza hídrica, aunque sea un fenómeno difuso en el conjunto de las ciudades, debería poseer una dimensión espacial, siendo posible su análisis y representación cartográfica. De poseerse datos de empresas de agua relativos a cortes por impago o número de retrasos por contrato, y que estos datos tuviesen una localización aproximada a nivel inframunicipal, se podría obtener una cartografía de incidencia, pero estos datos en su mayoría no son de libre acceso.

Ante esta situación se planteó una segunda hipótesis a demostrar en esta investigación: A partir de los datos ofrecidos por instituciones públicas como el Instituto Nacional de Estadística ¿Se podría medir y analizar la vulnerabilidad ante la pobreza hídrica mediante un SIG? En consecuencia, de probarse este planteamiento supondría la confirmación de la dimensión espacial del fenómeno, así como la predisposición de ciertas zonas a padecerlo. Por lo tanto, el objetivo principal es, a partir de los datos de fuentes públicas, elaborar una cartografía de vulnerabilidad mediante Sistemas de Información Geográfica aplicado a un área de estudio. De este objetivo se desprenden objetivos secundarios como: a) analizar pormenorizadamente el caso de estudio para cada indicador, b) evidenciar la incidencia desigual de los mismos dentro del espacio urbano, c) tratar la interrelación los indicadores como elementos integrados y no inconexos entre ellos, d) obtener y facilitar una información que pueda contribuir a la mejora de estas áreas, al presentar la información de manera visual y de fácil localización.

Ya entrando en la cuestión de la metodología empleada, en primer lugar, se consideró los años posteriores a la crisis de 2008 como los más idóneos para tratar el fenómeno dado el incremento de la pobreza. También se decidió emplear escalas de mayor nivel posible de disgregación de datos, y así evitar situaciones de enmascaramiento que suele darse en unidades espaciales demasiado grandes, integrando con facilidad estas zonas con una situación socioeconómica muy dispar, con lo que, al promediarse los datos, estos se suavizarían. Ejemplo de esta situación es la investigación de Cullis et al. (2003), que trataron de mapear la pobreza hídrica (entendida como escasez) en Sudáfrica, no pudiendo trascender el nivel municipal. Por ello se identificó al INE como la mejor fuente disponible por medio de dos grupos de datos que presenta disponibles: los Censos de Población y Vivienda (2001, y 2011), y la Estadística Experimental (2019) que recoge datos relativos a la renta media (disponible para el periodo 2015-2018). Al ser la unidad censal la unidad espacial más pequeña de análisis fue esta la seleccionada como idónea para el estudio. En el caso de los Censos, se trata de los datos y variables más actuales disponibles a nivel de detalle de unidad censal. Se espera que con el Censo de 2021 se actualicen, por lo que si bien a fecha actual son datos que muestran una vulnerabilidad pasada (2011), los datos del próximo censo permitirán su actualización a la vulnerabilidad en 2021 y con el impacto de la pandemia. Mientras que, en el caso de la Renta media, el año de datos más próximo al periodo de estudio es 2015, siendo el más adecuado de los disponibles.

Otro elemento disponible en el INE para su descarga, y que se vuelve fundamental a tenor de esta investigación, es que ofrece en formato *shape* la capa de unidades censales de toda España, y para varios años. En este caso por idoneidad de correspondencia de datos, se seleccionó el año 2011 como referencia, al ser la fecha de los datos del censo más reciente en ese momento. Disponer de este elemento, facilitado por el mismo organismo que proporciona los datos estadísticos a utilizar como fuente y base del modelo garantiza tanto fiabilidad como calidad de estos *inputs*. Que esta capa *shape* esté disponible, resulta fundamental para transformar unos datos puramente estadísticos, en datos que se circunscriben a una unidad espacial, una localización concreta y visual. Este proceso resulta posible gracias a la intervención de los SIG, ya que cargando esa capa y el fichero Excel en formato csv, se pueden vincular ambos, representar carto-

gráficamente esas variables, trabajar con ellas y generar nueva información con carácter espacial pero también estadístico, y también permitir el análisis espacial. El uso de los SIGs va a ser la herramienta que permite solventar la problemática de la localización en el espacio urbano, de una dinámica en origen dispersa y difusa por la ciudad como es la pobreza hídrica.

A continuación, se seleccionó Alicante como estudio de caso. Esta elección se justifica por tratarse de un municipio del sureste español de dimensiones medias (337.482 habitantes en 2020. INE, 2021), y con presencia de actividades turístico-residenciales. Esta actividad en concreto demanda ingentes cantidades de agua (Castiñeira et al., 2010), en un espacio con condiciones físicas semiáridas, proclive a periodos de sequía, y la que se emplean formas de obtención de recursos no convencionales como la desalación, cuestiones que tienen repercusiones en el precio y fiscalidad del agua (Olcina et al., 2016).

Tras decidir la escala de detalle y el municipio de estudio, se ha procedido a descargar del INE los ficheros de datos que han sido empleados como indicadores, unos ficheros en formato Excel que son los que se recogen en la Tabla 1, y de los que se debe señalar que: a) algunos de los ficheros disponibles en el Censo de 2011 están ligeramente incompletos por protección de datos (Faltan datos en menos de 30 unidades censales, de un total de 253). A fin de solventar estos datos en blanco de cara a la cartografía, se ha decidido rellenar esos huecos con el dato anterior más próximo, recurriendo al Censo de 2001, descargándose el fichero relativo. En la tabla 1, se han indicado estos casos por medio del año de fuente que emplean. Y b) algunos ficheros han sido empleados como indicador de forma directa, mientras que en otros solo se ha empleado parte de los datos. Por ejemplo, a partir del fichero de Población por sexo, se ha seleccionado solo a las mujeres para constituir el indicador relativo al Género. En la tabla 1 y entre paréntesis se ha indicado en estos casos el fichero original del INE.

Tabla 1. Fuente y año de los datos

INE: Censo de Población y vivienda	Año:
Edad del edificio (Año de construcción del edificio), Superficie de las viviendas, Género (Población por sexo), Nacionalidades vulnerables (Por región de origen), y Nivel de estudios.	2011
Estado del edificio, Sistema de agua caliente central, Estructura del hogar (población potencialmente vulnerable), y Tasa de Paro.	2001 y 2011
INE: Estadística Experimental, Atlas de distribución de renta de los hogares	Año:
Renta media (Renta media neta por hogar)	2015

2.1. Justificación del uso de los indicadores

La edad de los edificios de viviendas se consideró importante dado que por un lado las edificaciones antiguas (anteriores a 1920) por su naturaleza y condiciones previas a normativas edificativas, ventilación y humedades, materiales de construcción precarios, o instalaciones… constituyen edificios menos eficientes y seguros que los modernos, pero más asequibles, siendo más proclives a ser ocupados por personas vulnerables. También se consideró que los edificios de viviendas levantados en la posguerra y el desarrollismo (datos de 1941 a 1970), pueden presentar problemas de aluminosis por la mala calidad de los materiales (Tomé, 2010), siendo también proclives al deterioro, consecuente menor precio, y por ello ser ocupados por hogares vulnerables con recursos limitados (Campkin, 2013).

El estado del edificio se ha elegido como indicador al resultar corrector del anterior, pues una vivienda antigua puede estar rehabilitada, y presentar o no problemas de estado de conservación independientemente de la fecha de construcción. Vivir en un edificio en ruinas o mal estado por lo general no es fruto de la elección sino de la necesidad, siendo los residentes personas vulnerables.

El porcentaje de edificios de viviendas con sistema de calefacción central se ha elegido como indicador al tener carácter reductor de la vulnerabilidad al abaratar este sistema el coste del binomio agua y energía (Saurí, 2019); (Yoon, 2019). Por ello, un mayor número de edificios con este sistema atenuaría la vulnerabilidad, al tratarse de una cuestión de asequibilidad.

La superficie de las viviendas se ha considerado más adecuado que la densidad poblacional en unidades censales dada la casuística de los diferentes tipos de edificios y sus características, es decir, conocer de cuántos metros se componen las viviendas, ya que el tamaño medio del hogar en España es de 2,5 personas (INE, 2021). De igual forma, según esta misma fuente, la superficie media de la vivienda en España es de 90,6 m^2. Por lo tanto, una mayor presencia de viviendas con una superficie inferior incrementaría la vulnerabilidad dado el hacinamiento y peores condiciones del hogar, pero también ser más asequible a personas vulnerables. Mientras que viviendas más grandes excluyen a esta población que no puede costear su

precio o mantenimiento, siendo sus moradores menos vulnerables.

El porcentaje de hogares potencialmente vulnerables se consideró como indicador, ya que se considera como tales a las parejas ancianas (pensionistas), solas o en viudedad, personas jóvenes solas con hijos a su cargo o familias numerosas, y personas dependientes. Estas personas resultan vulnerables especialmente frente a situaciones de pobreza (Vázquez, 2006).

La variable de género como indicador ha sido considerada dado que las mujeres son un colectivo más vulnerable a padecer situaciones de pobreza, según autores como Sánchez (2009) o Tortosa (2001, y 2009). En consecuencia, una mayor presencia de mujeres supone una mayor vulnerabilidad, al poder ser consecuencia de situaciones como la soltería, viudedad, mujer sola con hijos, o personas a su cargo.

La nacionalidad ha sido seleccionada como indicador de vulnerabilidad, pero diferenciando aquellos extranjeros procedentes de países ricos (y por ende mejor situación socioeconómica), de aquellos procedentes de países y regiones pobres, siendo considerados vulnerables, al ser proclives a padecer situaciones de racismo y exclusión socioeconómica. Por ello, un porcentaje de población con estas características, además de mayor vulnerabilidad, supondría también una concentración espacial de estas personas, es decir, dentro del espacio urbano se estarían generando sectores de atracción, tanto por el sentimiento de comunidad generando autosegregación (Torres, 2001), como por ser sectores de viviendas más asequibles.

El nivel de estudios ha sido considerado como indicador dado que, por lo general, un menor nivel de estudios repercute en menor retribución salarial, mayor exposición al desempleo y la precariedad, dada la baja cualificación que limita las opciones de trabajo Cardona et al. (2007).

La tasa de paro ha sido considerada como indicador, puesto que tasas elevadas de desempleo comportan un número considerable de hogares con ingresos precarios o sin ellos, y por consiguiente mayor riesgo de pobreza. Por el contrario, tasas de desempleo menores indican un mayor número de hogares con ingresos, tenido un carácter atenuante de la vulnerabilidad.

La renta media neta por hogar se ha considerado como el más importante de los indicadores al medir el total de los ingresos, que de media tuvieron los hogares de las unidades censales, destinaron a sufragar el coste de vida. La importancia del indicador en estudios de pobreza es tal, que para medir esta, organismos como la UE indican como hogares pobres a aquellos por debajo del 50% de la renta media neta, y del 25% para la pobreza extrema, como recoge Benach et al. (2004). Un indicador en el que se aprecian diferencias con base al género (Del Río et al., 2008), nivel de estudios (De Pablos et al., 2005), lugar de origen (Mahia et al., 2014), la estructura del hogar, o el desempleo (Casado et al., 2010), indicadores que también se han considerado para el cálculo de la vulnerabilidad frente a la pobreza hídrica. Existen más variables en el Censo para medir en conjunto la pobreza, o la energética, por ello se han seleccionado solo las variables más próximas, aunque el peso de la pobreza en su conjunto es evidente, dado que la hídrica supone una pobreza extrema. Esta cuestión también conlleva que las zonas más vulnerables a la pobreza en sí, sean también las más proclives a la vulnerabilidad frente a la hídrica.

2.2. Tratamiento de los datos

Una vez se ha seleccionado la variable o variables a representar, los ficheros han sido preparados eliminando la información sobrante tras realizar los cálculos y agrupaciones de datos según correspondiese. En el caso de los indicadores cuya fuente de dato procedía de dos años, se han preparado de forma que los campos con la información a representar se titulasen del mismo modo a fin de poder unir ambas columnas en una sola, ya dentro de un SIG. Para esta investigación se eligió como Sistema de Información Geográfica el software Qgis 2.18, de carácter libre. A fin de poder trabajar con estos ficheros de datos en Excel, han sido guardados como csv, a fin de emplearlos como bases de datos dentro de Qgis 2.18.

Dentro de este *software*, se ha cargado una capa con las unidades censales de 2011 del INE, realizándose para cada uno de los indicadores. A continuación, se han cargado los ficheros en formato csv relativos a cada indicador. En el caso de aquellos completos, es decir, aquellos procedentes del Censo de 2011 y que poseen información de todas las unidades censales, simplemente se ha realizado una unión entre la capa de unidades censales y estas bases de datos en csv. Para ello se ha indicado la columna con el código de unidad censal de ambos elementos como el común a partir del cual realizar la unión. De forma que al objeto espacial que representa una unidad censal, por medio de ese código identificador, ahora además de superficie, lleva aparejada la variable o variables de datos, estando listos para su representación.

En el caso de los indicadores con intervalos vacíos en los datos de 2011, y para los que se recurrió al censo anterior (2001), al ser preferible un dato puntual menos actual a la ausencia total del dato, se empleó un procedimiento distinto. Primero, en lugar de una capa de unidades censales, en estos indicadores fue-

ron cargadas dos, siendo una para cada censo (2001 y 2011). Una vez cargadas estas capas, se cargaron los dos ficheros csv del indicador, y se unió cada uno con una capa de unidades censales. Al tener dos capas idénticas en cuanto a objetos espaciales, pero con datos diferentes, se ha recurrido a la opción selección por localización, indicando que en la capa de 2001 se han de seleccionar aquellas unidades censales que contienen una unidad censal de la capa de 2011. Es decir, con un objeto espacial con datos de 2011 sobre ellas. Una vez realizada esta selección, se han eliminado estos objetos espaciales de la capa de 2001, y se han eliminado de la capa de 2011 los objetos espaciales sin datos. Se han guardado las capas como una nueva para cada una con los datos incorporados. Por último, se han unido ambas capas nuevas en una sola por medio de la opción "combinar capa vectorial", teniendo como resultado una sola capa, que posee datos para el mayor número de unidades censales posibles, estando ya preparada para su representación.

La representación de las variables se ha realizado siguiendo una escala de tipo Likert. Esta escala, común en estudios que abordan la pobreza (Silva, 2017), permite valorar las variables tanto positiva como negativamente, según contribuyan a aumentar o disminuir la vulnerabilidad. Estas llevan aparejada una puntuación que se sitúa en el rango de -3 a +3 puntos, por medio de hasta cinco rangos, y siendo el intermedio un valor neutro. En caso de ser un indicador que solo incremente la vulnerabilidad, se han empleado 4 rangos que abarcan una puntuación positiva de 0 a 3 puntos. Por el contrario, solo el indicador de edificios con sistema de agua caliente central (reductor), presenta sus cuatro rangos con una ponderación que abarca de -3 a 0 puntos. Es decir, se trata de un indicador reductor de la vulnerabilidad, al suponer menores consumos que los sistemas individuales. Solo el indicador de renta media neta por hogar recibe una ponderación distinta por medio de 5 rangos. Presentando una ponderación desde -10 a +10 puntos. La razón de que este indicador posea más peso de cara al cálculo final de la vulnerabilidad se debe a que la media del capital anual disponible en el hogar por unidad censal, tiene un peso determinante en cuestiones de pobreza. Por ello se ha decidido asignarle una puntuación más elevada, a fin de evitar que otros indicadores secundarios puedan enmascarar los valores del indicador principal.

Finalmente, para obtener la vulnerabilidad ante la pobreza hídrica, se ha realizado en cada una de las capas una función *Case*, indicando en la calculadora de campos la ponderación correspondiente a cada variable, obteniendo en una nueva columna la ponderación de cada unidad censal para ese indicador (WHEN "renta_media" > 0 and "renta_media" <18000 THEN "-10"). Una vez realizado para cada capa de cada indicador, estas se han ido combinando, a fin de tener todas las puntuaciones en una sola capa. Por medio de la calculadora de campos, se han sumado los valores de resultado para cada unidad censal, y expresado en un nuevo campo, donde ese total para la unidad censal, se corresponde con su vulnerabilidad ante la pobreza hídrica. Finalmente, y siguiendo el modelo, se ha clasificado el resultado en cinco rangos para su representación, diferenciándose entre vulnerabilidad muy baja, baja, media, alta y muy alta.

3. RESULTADOS

En este apartado se exponen primeramente los resultados del tratamiento de los indicadores, así como su análisis (objetivo a), la incidencia desigual entre zonas urbanas dentro de cada indicador (objetivo b), y la interrelación entre los indicadores enfocada a la pobreza hídrica (objetivo c). En segundo lugar, se expone el resultado principal (figura 6), que cumple con la hipótesis planteada y objetivo principal, al demostrar que, por medio de datos públicos, se puede mediante un SIG analizar la pobreza hídrica dentro del espacio urbano, dotándola de un carácter espacial definido. Es decir, evidenciando zonas de mayor o menor vulnerabilidad en la ciudad de Alicante. Ello supone generar una información útil de cara a la gestión del problema (objetivo d), y haber creado un modelo replicable a cualquier municipio español (objetivo c).

En la primera de las figuras (figura 1), se puede apreciar en el cuadrante superior izquierdo el resultado del indicador de la edad de los edificios. Se consideró que un porcentaje de edificios significativo dentro los periodos representados, supone un incremento de la vulnerabilidad. En Alicante, solo zonas como el casco antiguo situado sobre el puerto presentan más de un 30% de edificios previos a 1920. Por el contrario, el crecimiento demográfico del franquismo se evidencia en la proyección de la ciudad hacia San Vicente (noroeste), presentando la mayoría de unidades censales más de un 40% de edificios de viviendas de este periodo. En el cuadrante superior derecho, se muestra el estado de los edificios de vivienda en Alicante, En el caso de Alicante, el sector litoral, centro, San Antón y Carolinas; así como la proyección hacia Altozano, Sidi Ifni y Virgen del Carmen (Zona Norte) presentan los peores resultados, con incluso más de un 10% de edificios de viviendas en estado de ruina. Situación que también ocurre en el barrio de San Blas al Oeste.

En el cuadrante inferior izquierdo, se muestra el indicador de viviendas con sistema de calefacción central. En el caso de Alicante solo las unidades censales del Ensanche de Diputación y área de Mercado presentan un número considerable. Por el contrario, en cuanto a la superficie de vivienda que muestra el

cuadrante inferior derecho, las viviendas por debajo de los 90 m^2 (valor neutro) predominan por toda la ciudad, pero destacan dos ejes desde el centro, uno hacia el norte por Carolinas, Sidi Ifni y Virgen del Carmen, y un segundo eje oeste hacia San Fernando. En estos ejes son significativas las unidades censales con más de un 15% de viviendas por debajo de 60m^2.

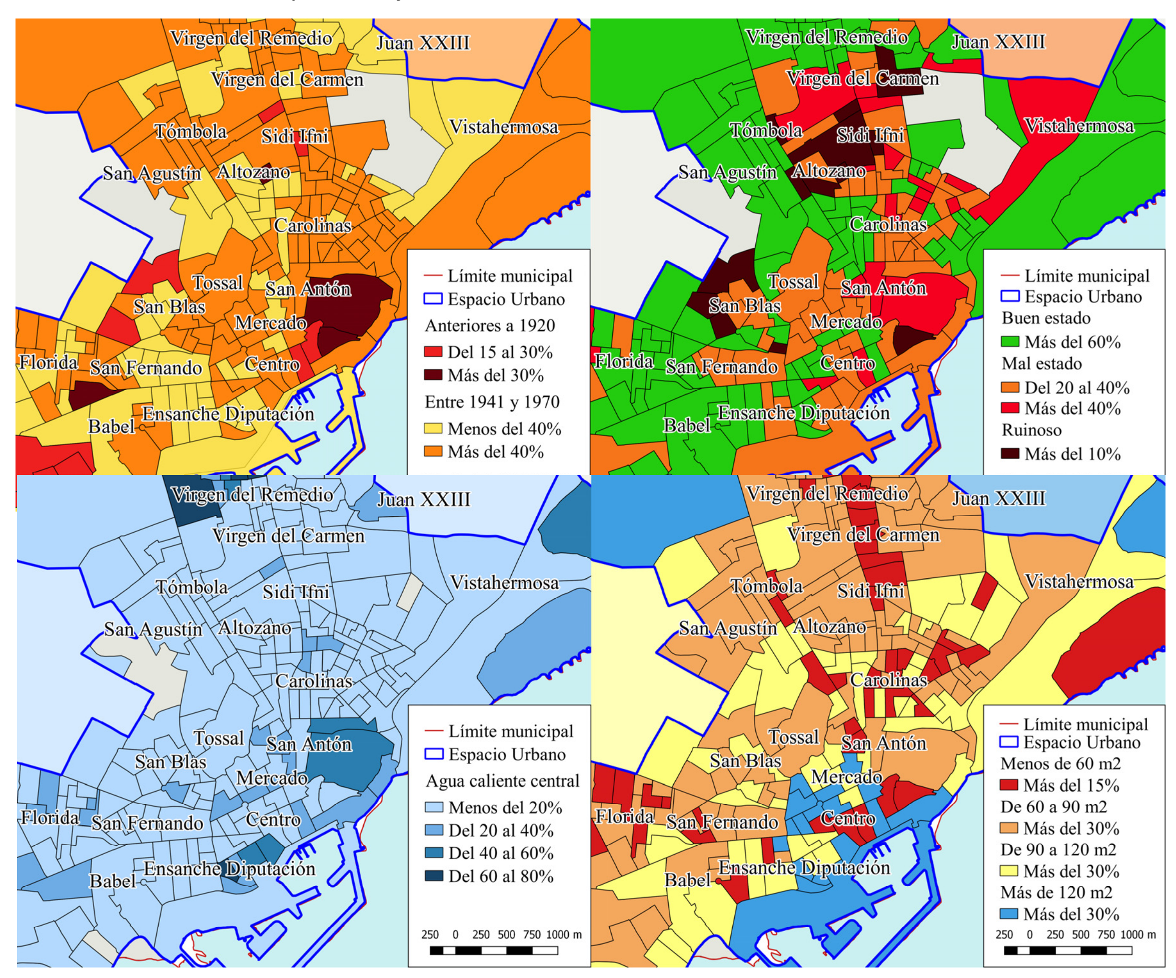


Figura 1. Mosaico de los Indicadores de edad, estado de los edificios, aquellos con sistema de agua caliente central, y superficie de las viviendas en Alicante.

En la figura consecutiva (figura 2), se muestra el indicador relativo a hogares potencialmente vulnerables en el cuadrante superior izquierdo, y en el superior derecho el indicador de género. En el primero de ellos, destaca el sector central de Alicante (Centro, Mercado y San Antón) así como el eje hacia el norte (Carolinas, Virgen del Carmen y del Remedio), y eje hacia el oeste (San Fernando) presentan los peores resultados, con más de un 25% de los hogares en esta situación. Mientras que, en cuanto a género, en la ciudad de Alicante, vuelven a destacar también en este indicador los dos ejes centro-norte y centro-oeste, que se llevan apreciando en los indicadores anteriores. Especialmente destaca el sector central, donde el envejecimiento poblacional puede ser la causa principal. No en vano hubo una fuerte urbanización durante la posguerra, y los nuevos residentes de entonces, a fecha de los datos ya se emplazarían en la senectud.

En los cuadrantes inferiores, se muestran los indicadores de población extranjera potencialmente vulnerable (izquierda) y de nivel de estudios (derecha). En el primero de ellos, destaca el sector de los barrios de Virgen del Remedio y del Carmen, y Colonia Requena en Alicante (Zona Norte), donde se concentra principalmente la población originaria de países árabes. El indicador de nivel de estudios, y enlazando con el indicador anterior, el mismo sector de la Zona Norte destaca por una presencia significativa de personas analfabetas o sin estudios. En la ciudad de Alicante, se puede observar la predominancia del grupo de personas con estudios de segundo grado, equivalente a la Educación Secundaria obligatoria, mientras que es en el centro y San Juan playa, las áreas principales de la actividad socioeconómica y turístico residencial, donde destaca la mayor presencia de personas con estudios superiores. Es justo en los barrios de las afueras como San Fernando, San Blas, y el eje Carolinas-Zona Norte donde las personas con estudios primarios o incluso inferiores superan el 15%.

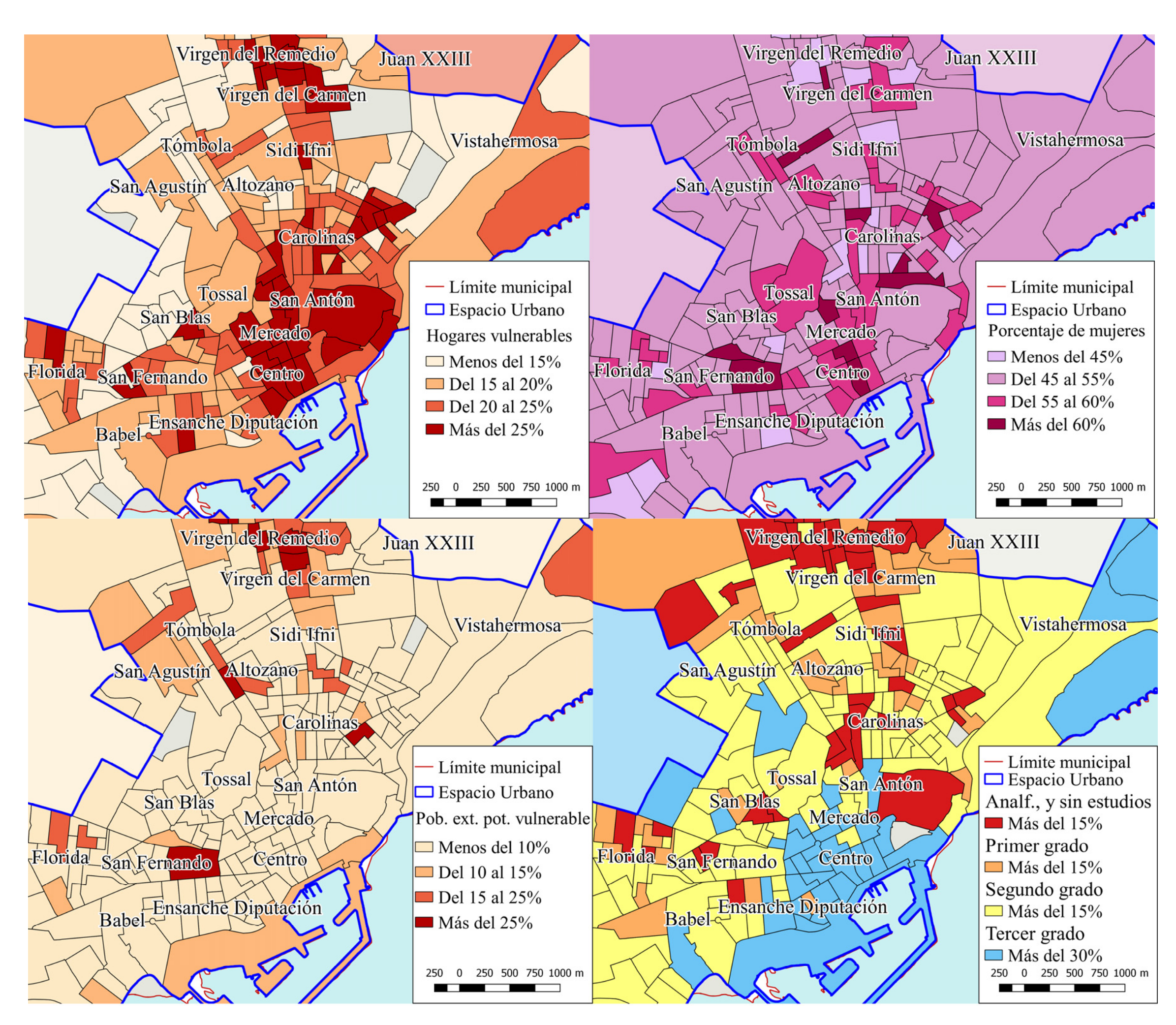


Figura 2. Mosaico de los indicadores de hogares potencialmente vulnerables, género, población extranjera potencialmente vulnerable, y nivel de estudios en Alicante.

Los restantes dos indicadores vienen recogidos en la figura 5, siendo la tasa de paro (izquierda) y de la renta media neta anual (derecha). En cuanto a la tasa de paro en Alicante, se puede apreciar una distribución radiocéntrica, siendo menor el desempleo en el centro, y creciente hacia el extrarradio. Dentro de esta dinámica, se aprecia la prevalencia de los barrios situados al norte, tanto del eje Carolinas – Zona Norte (Virgen del Carmen y V. del Remedio), como los del sector Altozano, San Agustín y Tómbola. En estos barrios el desempleo superaba el 45% de la población activa. Una situación que contrasta con los barrios del centro que en su mayoría presentaban a fecha de los datos tasas por debajo del 20%, e incluso del 10%. Estos dos últimos rangos se consideraron reductores ya que la tasa de paro nacional a fecha de los datos superaba el 20%. En cuanto al indicador de la renta media neta, en la ciudad de Alicante muestra un resultado que prácticamente repite el de indicadores anteriores. Un sector centro y litoral con ingresos más elevados, y por tanto computa menor vulnerabilidad ante una cuestión de asequibilidad como es la pobreza hídrica. Mientras que el eje hacia el norte desde el Casco Antiguo, San Antón, Carolinas, Sidi Ifni, Virgen del Carmen y Virgen del Remedio se emplazan por debajo de los 18.000€ euros anuales, que teniendo en cuenta que el tamaño medio por hogar es de 2,5 personas evidencia la situación precaria y vulnerable de dichos hogares.

El hecho de que los indicadores anteriores identifiquen a las mismas zonas como aquellas con peores resultados da muestra de la interrelación entre ellos (objetivo c). Esta cuestión queda patente en la figura 6 que recoge la vulnerabilidad ante la pobreza hídrica en Alicante, una vez sumadas las puntuaciones para cada indicador en cada unidad censal. En ella se evidencia el eje desde el Casco Antiguo-Santa Cruz hacia los barrios de la Zona Norte como el sector de la ciudad más vulnerable. Si bien en el centro de este eje (zona de Carolinas) la vulnerabilidad predominante es alta frente a la muy alta de solo algunas unidades censales, hay una gran concentración en la Zona Norte de unidades censales con una vulnerabilidad muy alta. Este sector en que se emplazan los barrios de Sidi Ifni, Virgen del Remedio, Virgen del Carmen y Colonia

Requena ha mostrado los peores resultados en prácticamente todos los indicadores anteriores, y por lo tanto este espacio urbano se identifica como aquel más vulnerable ante la pobreza hídrica. También otras zonas vulnerables ante ella fueron el sector de la Tómbola-Los Ángeles al noroeste del Centro, y el área de Ciudad de Asís-San Fernando. Por el contrario, la menor vulnerabilidad se localiza en los sectores del Cabo de las Huertas y el Centro. Siendo estas últimas las zonas socioeconómicamente más activas, demandadas y mayor poder adquisitivo, como también refrendan los datos de los indicadores analizados.

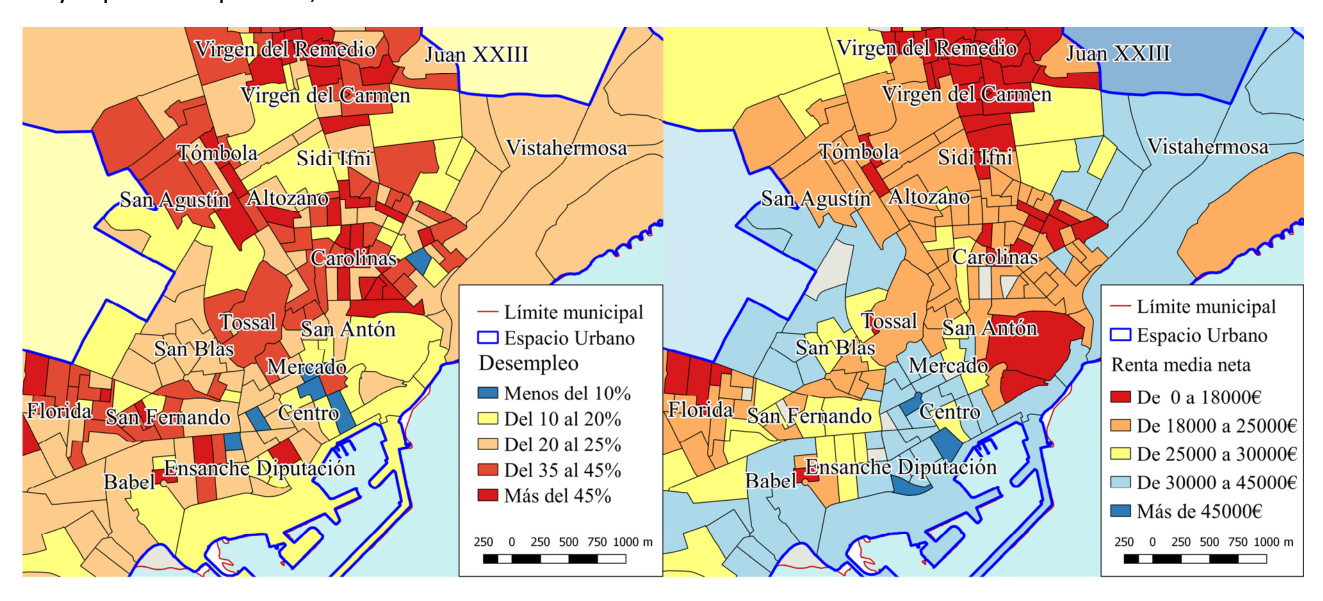


Figura 3. Indicadores de tasa de desempleo, y renta media neta anual en Alicante.

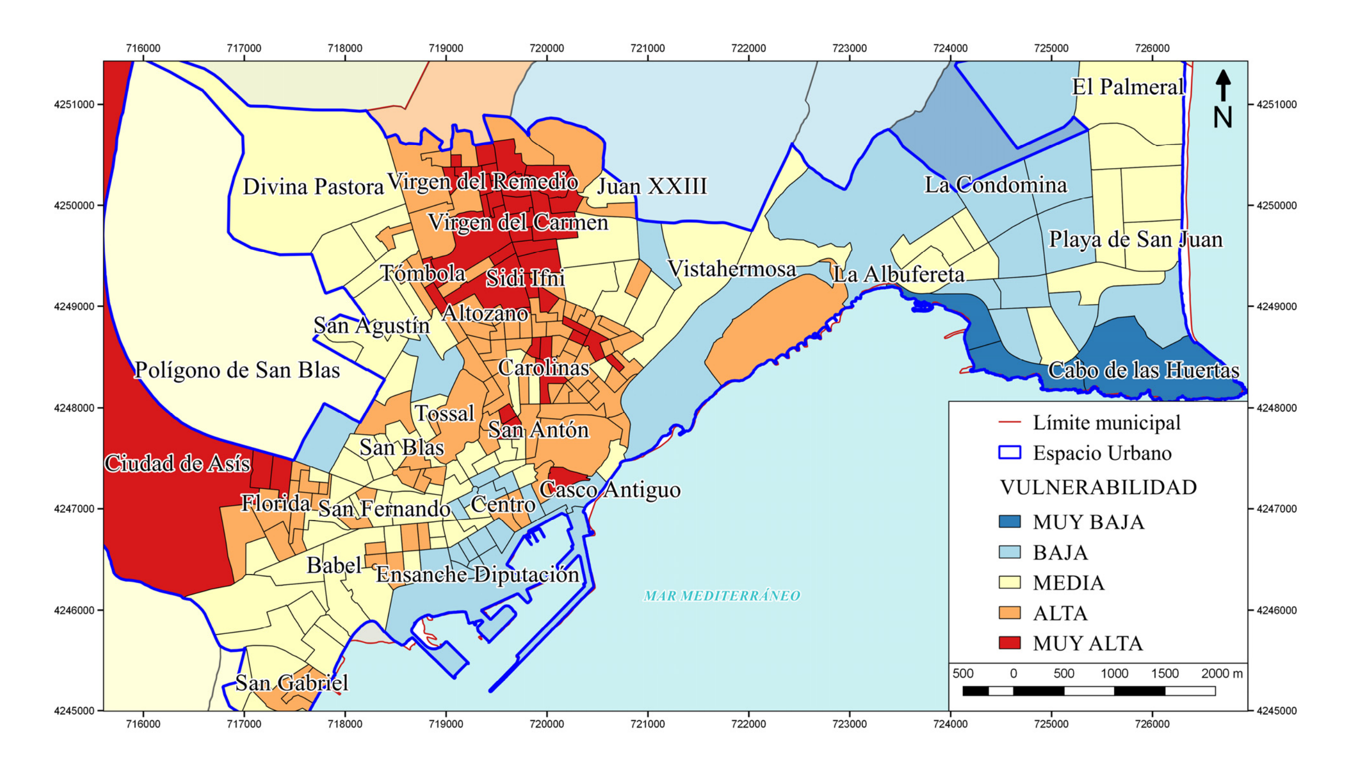


Figura 4. Mapa de vulnerabilidad frente a la pobreza hídrica Alicante.

4. CONCLUSIONES

El empleo de Sistemas de Información Geográfica ha permitido, a partir de datos estadísticos oficiales, modelizar y cartografiar la vulnerabilidad frente a la pobreza hídrica, entendida como la dificultad de los hogares de hacer frente a los recibos del consumo de agua, cumpliendo la hipótesis planteada. Siendo idóneos para dar dimensión espacial a datos estadísticos por medio de un identificador común como, por

ejemplo, el código censal, empleando el ejemplo del tomado en la investigación.

Esta cartografía de vulnerabilidad, al realizarse por medio de una serie de indicadores que miden tanto las condiciones del edificio de vivienda, la estructura del hogar, elementos de vulnerabilidad como el género, personas vulnerables por su situación y condición, así como variables económicas relativas a la situación del hogar como el desempleo o la renta media neta, permiten radiografiar a escala de unidad censal la realidad del municipio para cada indicador. Por lo que mediante la representación espacial y posterior análisis, se evidencian aspectos negativos que incrementan la vulnerabilidad frente a la pobreza (en concreto la hídrica), pero también elementos positivos que la disminuyen. Identificando, a su vez, patrones entre los resultados de los indicadores, que refuerzan el carácter de reducción o incremento de la vulnerabilidad, lo que evidencia la interrelación entre los indicadores, como elementos integrados. Es decir, apuntando a que la pobreza hídrica es resultado de causas profundas de desigualdad entre los colectivos urbanos que se reparten por las ciudades, y no una mera situación coyuntural, aunque sean las consecuencias de una crisis económica las que visibilicen del fenómeno. Cumpliendo con todo ello los objetivos a), b) y c) propuestos en esta investigación.

También esta cartografía, como resultado final que plasma la vulnerabilidad frente a la pobreza hídrica en un mapa, permite gestionar el problema tanto por parte de organismos públicos, como aquellas organizaciones no gubernamentales de ayuda social, ya que los datos son públicos y gratuitos, se pueden emplear programas de Sistemas de Información Geográfica como Qgis que también son gratuitos, y se puede replicar la modelización a cualquier municipio español con varias unidades censales urbanas, lo que permite identificar las áreas concretas sobre las que convendría actuar, realizar campañas de concienciación y difusión de ayudas disponibles, implementarlas, o dar a conocer los programas de ayuda social con el pago de facturas de agua a personas vulnerables y en situación o riesgo de exclusión social.

Con todo ello, esta cartografía tiene el potencial no solo de medir la vulnerabilidad de un fenómeno que tuvo su máximo en los años posteriores a la crisis en que se agudizaron sus efectos, sino que permite conocer la vulnerabilidad de cada ciudad frente a eventos futuros como nuevas crisis, o los efectos socioeconómicos a largo plazo que pueda tener la actual pandemia, una vez se publiquen los datos del Censo de 2021. Este nuevo censo permitiría actualizar los datos para el mapa de vulnerabilidad, y analizar la evolución entre la situación tras la crisis de 2008 y la crisis pandémica. Esto le dota de potencial para contribuir a mejorar la gestión urbana y de las políticas socioeconómicas locales de ser tenida en cuenta, en aras de la reducción de la pobreza y alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible marcados por la Agenda 2030.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es resultado de un contrato destinados a la formación predoctoral financiado por la Universidad de Alicante (UAFPU2019B-01) y del proyecto de investigación "Evaluación de la pobreza hídrica en entornos urbanos del litoral mediterráneo: estudios de caso (PID2019-104456RB-C22) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

5. BIBLIOGRAFÍA

Aganzo Toribio, A., Gavela Álvarez, A. J., Nuño Mayer, J. y Sánchez Delgado, F. M. (2009). Inserción laboral de las personas en situación de pobreza yo de exclusión social. *Educación social: Revista de intervención socioeducativa*, 41, 48-69.

Bradshaw, J. y Huby, M. (2013) Water Poverty in England and Wales. *Journal of poverty and Social Justice, 21, 137-148* https://doi.org/10.1332/175982713X669835

Benach, J. y Amable, M. (2004). Las clases sociales y la pobreza. *Gaceta Sanitaria*, *18*, 16-23.

Campkin, B. (2013). *Remaking London: Decline and regeneration in urban culture*. Bloomsbury Publishing. London. Ibtauris.

Cardona Acevedo, M., Montes, I. C., Vásquez Maya, J. J., Villegas González, M. N. y Brito Mejía, T. (2007). Capital humano: una mirada desde la educación. *Serie Cuadernos de Investigación*, *56*.

Casado García, J. M., Fernández Vidaurreta, C. y Jimeno Serrano, J. F. (2010). La incidencia del desempleo en los hogares. *Boletín Económico*, (NOV), 1-7.

Baños Castiñeira, C., Vera Rebollo, J. F. y Díez Santo, D. (2010). El abastecimiento de agua en los espacios y destinos turísticos de Alicante y Murcia. *Investigaciones Geográficas*, 51, 81-105.

Cullis, J. y O'regan, D. (2004) Targeting the water-poor through water poverty mapping. *Water Policy, 6*, 397–411. https://doi.org/10.2166/wp.2004.0026

Del Río, C., Gradín, C. y Cantó, O. (2008). Pobreza y discriminación salarial por razón de género en España. *Revista de Economía Pública*, *184*, 67-98.

De Pablos Escobar, L. y Gil Izquierdo, M. (2005). Los rendimientos y la productividad de la educación. *Presupuesto y Gasto público*, *39*, 49-72.

Instituto Nacional de Estadística (2001) *Censos de población y viviendas.*

Instituto Nacional de Estadística (2011) *Censos de población y viviendas.*

Instituto Nacional de Estadística (2021) *Revisión del Padrón Municipal*.

Instituto Nacional de Estadística (2019) *Estadística experimental: Atlas de distribución de renta de los hogares.*

Instituto Nacional de Estadística (2021) E*ncuesta continua de hogares*.

Llorente Heras, R. (2020). Impacto del COVID-19 en el mercado de trabajo: un análisis de los colectivos vulnerables. *Documentos de Trabajo, 2,* 1-29.

Mahía, R. y De Arce, R. (2014). Pobreza de la población extranjera en España. *Anuario CIDOB de la inmigración*, 135-162.

Molle, F. y Mollinga, P. (2003) Water poverty indicators: conceptual problems and policy issues. *Water Policy*, 5, 529–544. https://doi.org/10.2166/wp.2003.0034

Morote Seguido, Á. F., Hernández-Hernández, M. y Rico Amorós, A. (2018). Patrones de consumo de agua en usos turístico-residenciales en la costa de Alicante (España)(2005-2015). Una tendencia desigual influida por la tipología urbana y grado de ocupación. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, *38*, 357-383. https://doi.org/10.5209/AGUC.62484

Olcina Cantos, J., Sauri Pujol, D. y Vera Rebollo, J. F. (2016). Turismo, cambio climático y agua: escenarios de adaptación en la costa mediterránea española. En J. Olcina y A. M. Rico *(Coords.), Libro Jubilar en Homenaje al Profesor Antonio Gil Olcina, 171-193.* Alicante: Instituto Interuniversitario de Geografía. Universidad de Alicante.

Silva Arciniega, M. D. R. (2017). "Dimensiones psicosociales de la pobreza: percepción de una realidad recuperada". En S. De la Vega Estrada, K. Rodríguez. (Coords.), *Vol. 4: Nuevos escenarios mundiales, repercusiones en México y potencialidades regionales.* México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Sullivan, C. (2002). Calculating a water poverty index. *World development*, *30*, 1195-1210.

Tomé Fernández, S. (2010). Cien barriadas de posguerra, hoy (Asturias y León). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 52, 165-188.

Torres Chamorro, S. (2001). Visibilización de la emigración magrebí en el espacio urbano. *Aldaba: revista del Centro Asociado a la UNED de Melilla*, 31, 315-330.

Tortosa Blasco, J. M. (Ed.). (2001). Pobreza y perspectiva de género *RTS: Revista de Treball Social*, 195, 36-45.

Tortosa Blasco, J. M. (2009). Feminización de la pobreza y perspectiva de género. *Revista Internacional De Organizaciones*, 3, 71–89. https://doi.org/10.17345/rio3.71-89

Vázquez Sotelo, O. (2006). Cuarto mundo o la pobreza en el Norte. *Contribuciones a la Economía*.

Yoon, H. (2017) La Politización de la energía y del agua desde las poblaciones vulnerables. El caso de la pobreza energética e hídrica en Barcelona. *Naturaleza, territorio y ciudad en un mundo global*, 2017, págs. 1239-1247.

Yoon, H., Saurí, D. y Domene, E. (2019) The water-energy vulnerability in the Barcelona metropolitan area, *Energy and Buildings*, 199, 176-189. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.039



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 441-450

Clasificación de las ciudades españolas en función de sus usos del suelo

M. Cambas-Muñoz[1], C. Vergara-Fernández[1], F. Aguilera-Benavente[1]

[1] Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Universidad de Alcalá. C. Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares.

marcos.cambasmunoz@edu.uah.es, cristian.vergara@uah.es, f.aguilera@uah.es

RESUMEN: La clasificación de ciudades históricamente se ha realizado a través del análisis de variables socioeconómicas, la movilidad, aspectos como la residencia-trabajo y morfología urbana. No obstante, su clasificación en relación con la ocupación del suelo no ha sido ampliamente explorada debido a la carencia de bases de datos con suficiente nivel de resolución temática y espacial. El presente estudio propone una clasificación de 72 ciudades españolas (capitales de provincia y ciudades de más de 100.000 habitantes) de acuerdo a la composición de usos del suelo, generada a partir del registro de datos catastrales de la administración española y su procesado previo mediante la herramienta para QGIS "Clasificador Catastral". Para llevar a cabo la clasificación, se realizaron dos técnicas multivariantes sucesivas: un análisis factorial que sirvió para determinar los usos del suelo que mejor explican la varianza entre las ciudades, y un análisis de conglomerados que fue empleado para agrupar las ciudades con composiciones de uso del suelo similares. Del análisis factorial se extrajeron los 3 factores más influyentes: el primero relacionado con viviendas y servicios de uso público (factor de compacidad) y los otros dos vinculados a actividades del sector terciario y secundario. Posteriormente, tras el análisis de conglomerados, se proponen 5 grupos diferentes que representan la variabilidad de las ciudades españolas en lo que respecta a la ocupación de suelo urbano. La presente clasificación puede resultar de utilidad tanto para futuros estudios como para la planificación y desarrollo de los asentamientos urbanos.

Palabras-clave: Usos del suelo urbano, análisis de conglomerados, clasificación de ciudades, análisis factorial.

1. INTRODUCCIÓN

La urbanización es uno de los principales procesos de transformación de la superficie terrestre a nivel global. Este proceso comenzó a partir del inicio del siglo XX y ha sido ampliamente documentado en las últimas décadas a través del análisis de imágenes satelitales (Song et al., 2018, Radwan et al., 2021). Actualmente el 50% de la población mundial vive en ciudades y se proyecta que, para el año 2050, este porcentaje alcanzará el 75% (Ritchie y Rose, 2008). Esta población está concentrada en zonas urbanas que representan alrededor del 3% de la superficie global (Liu et al., 2014). Sin embargo, producen impactos ambientales (Bhuvandas et al., 2012) y sociales (Vlahov y Galea, 2002) a gran escala, lo que hace inevitable profundizar en su estudio a fin de avanzar hacia las metas definidas por los objetivos de desarrollo sostenible. Las áreas urbanas alrededor del mundo no son homogéneas, y se caracterizan por su tamaño, número de habitantes y las principales actividades económicas que se desarrollan en ellas (Kwan et al., 2014). Estas variables pueden ser utilizadas para crear sistemas de clasificación de ciudades que permiten apoyar los futuros procesos de planificación y el desarrollo de asentamientos urbanos.

La clasificación de ciudades tiene una larga tradición en la geografía urbana. Harris (1943), en uno de los primeros trabajos en la materia, realizó una clasificación asociada a la función económica de 984 ciudades en Estados Unidos, a partir de datos de ocupación y empleo. Esto permitió describir nueve tipos de ciudades y su distribución espacial dentro del país, identificando patrones de localización de ciudades manufactureras, mineras y de servicios. A partir de 1950, las clasificaciones de ciudades han incorporado progresivamente enfoques basados en técnicas estadísticas y análisis multivariados como el análisis de conglomerados, análisis de discriminante, y el análisis de componentes principales (Freestone et al., 2003). A modo de ejemplo, utilizando estos métodos, se identificaron 13 grupos asociados a la función económica de 741 ciudades en Australia incluyendo ciudades de servicios mineros, turismo, de procesamiento y producción rural (Freestone et al., 2003).

En las últimas décadas el aumento en la disponibilidad de datos espaciales, junto con el desarrollo de

técnicas de análisis de patrones espaciales a través de sistemas de información geográfica, y el cálculo de métricas del paisaje (Turner et al., 1990) han permitido desarrollar nuevos sistemas de clasificación de ciudades asociadas a la forma y configuración espacial de las teselas que componen el uso urbano (Huan et al., 2007). A este respecto, se han generado clasificaciones de las principales ciudades europeas a partir de métricas del paisaje y datos de densidad poblacional, identificando de esta manera patrones de agrupamiento que caracterizan distintos niveles de dispersión y compacidad (Schwarz et al., 2010). De igual manera, estas técnicas se han utilizado para clasificar las zonas urbanas y los procesos de crecimiento en la localidad de Algarve, Portugal (Aguilera-Benavente et al., 2014) y las áreas metropolitanas de España (Pascual-Rosa et al., 2019), entre otras. Sin embargo, la clasificación de ciudades a partir de la configuración espacial no permite conocer las principales funciones económicas de las mismas.

Los usos del suelo son la expresión espacial de las actividades económicas desarrolladas dentro del espacio urbano. La clasificación de las ciudades a partir de los usos del suelo es particularmente difícil debido a la escasez de bases de datos con suficiente riqueza temática. Anderson *et al. (1976)* ofrece un marco clasificatorio para usos urbanos que puede considerarse la base sobre la que se han desarrollado muchos otros: US Geological Survey (USGS), National Land Cover Characterization (NLCC), Food and Agriculture Organization (FAO) (Cadenasso et al., 2007). Si bien estos marcos buscan capturar la heterogeneidad temática de los suelos urbanos, todas estas clasificaciones están basadas en técnicas de observación remota, asociadas de forma inevitable a los problemas de precisión y escala. Las limitaciones de estas técnicas para la clasificación de usos del suelo son observables en las bases de datos más utilizadas a nivel europeo: CORINE, con un número de clases muy limitado para la caracterización de suelos urbanos, o Urban Atlas, con una mayor riqueza temática, pero con una gruesa resolución (10 m). Esto limita el estudio de la funcionalidad de las ciudades, lo que ha incentivado la búsqueda de nuevas técnicas de clasificación de uso del suelo urbano.

En esta línea, recientemente se ha desarrollado un método para poder generar clasificaciones de uso del suelo urbano a partir de los datos del Catastro, implementado en el complemento de QGIS clasificador catastral (*cadastral classifier*) (Shurupov et al., 2022). Esta novedosa herramienta permite hacer uso de las bases de datos del catastro para generar clasificaciones del uso de suelo urbano con distintos niveles de complejidad. Entre otros usos, esta herramienta permite por primera vez explorar la clasificación de ciudades en España a partir de la composición de usos del suelo con una alta riqueza temática, resolución espacial y nivel de detalle. En este contexto, este estudio propone una clasificación de las ciudades españolas basada en la composición de usos del suelo de su área urbana. Para ello, se marcaron tres objetivos principales: obtener el área ocupada por cada uso en las distintas ciudades, encontrar qué actores explican la variabilidad de los usos del suelo presentes en ellas mediante análisis factorial y, finalmente, agrupar las ciudades en base a la mayor o menor presencia de estos factores con un análisis de conglomerados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Para el desarrollo del presente trabajo, se analizaron un total de 72 ciudades españolas, que incluyeron las capitales de provincia, así como las ciudades de más de 100.000 habitantes. No se incluyeron en esta selección aquellas ciudades que, cumpliendo alguno de los criterios anteriores, se encontrasen en las comunidades autónomas del País Vasco o la Comunidad Foral de Navarra, ya que no existe información sobre ellas en la dirección general del catastro (ver epígrafe 2.2) al tener transferidas las competencias en la materia. En cualquier caso, el conjunto de ciudades representa de manera suficiente la variabilidad de los espacios urbanos existentes (costeros y de interior, de gran tamaño o de tamaño medio). La Figura 1 muestra la ubicación de las áreas urbanas seleccionadas.

2.2. Datos de partida

Los datos de partida para la clasificación de las ciudades españolas se obtuvieron de Catastro de bienes inmuebles disponible en la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de la Dirección General del Catastro (DGC). La función principal del Catastro es el registro administrativo de los bienes inmuebles rústicos, urbanos y de características espaciales (DGC, 2022).

La elevada complejidad del modelo de datos catastral dificulta el proceso de obtención de datos de uso del suelo (Martín-Jiménez y Rodríguez-Espinosa, 2022); no obstante, la herramienta para QGIS Clasificador Catastral (Shurupov et al, 2022) permite obtener de manera sencilla clasificaciones de los usos del suelo a nivel de parcela con diferentes niveles de desagregación temática, ofreciendo 3 niveles de clasificación: básica, intermedia y personalizada. Para la realización de este estudio se utilizó la clasificación intermedia ya

que ofrece un buen nivel de desagregación a la vez que es fácilmente replicable en futuros estudios. La Figura 2 muestra un ejemplo de la clasificación generada para las ciudades de Alcalá de Henares y Lugo. De las 16 categorías que ofrece la clasificación intermedia, se descartaron 2 usos: “Otros”, al no presentar información relevante para el estudio, y “Sin edificar”, ya que en esta categoría Catastro agrupa diferentes usos del suelo sin objeto recaudatorio, como parques urbanos, entendiendo que esta categoría debería ser desagregada para poder ser interpretada. Por tanto, la clasificación estuvo basada en las 14 categorías de uso del suelo restantes (ver Tabla 1). Una vez generadas las clasificaciones de los usos del suelo a nivel de parcela para cada una de las 72 ciudades, se calculó el porcentaje de ocupación de cada uso respecto a la superficie urbana de la ciudad.

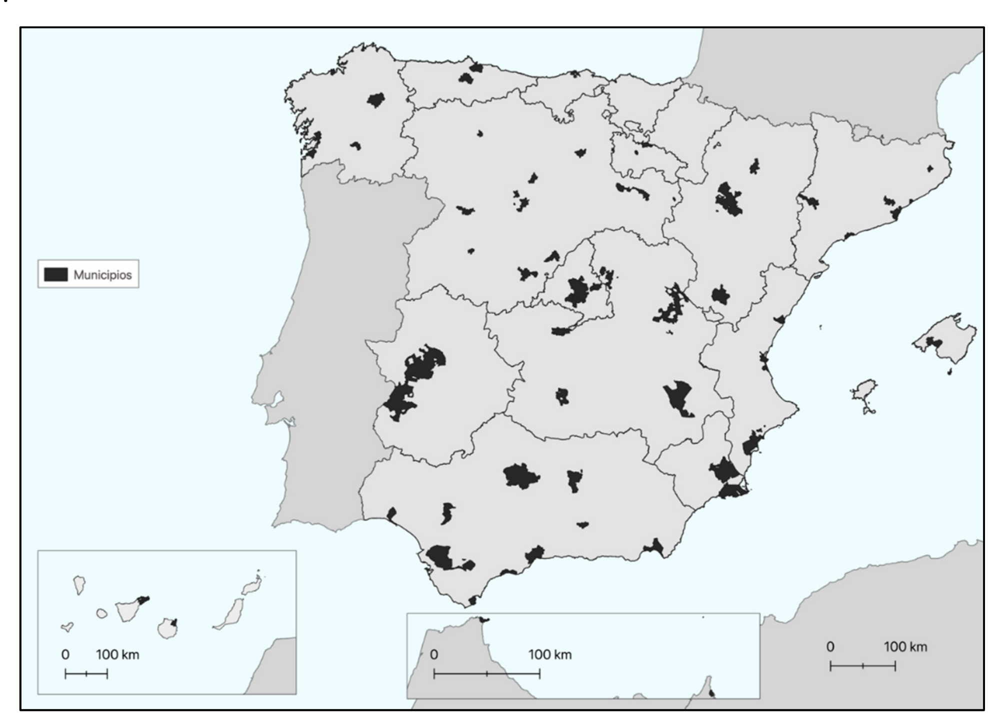


Figura 1. Límites municipales analizados en el estudio.

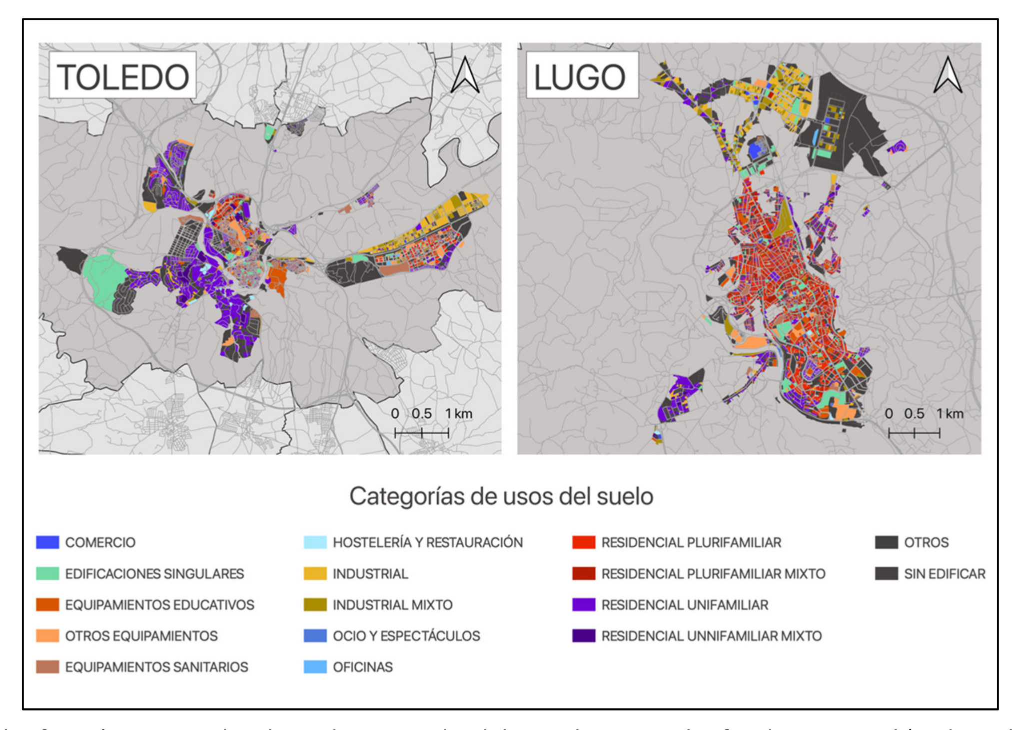


Figura 2. Clasificación intermedia obtenida por medio del complemento Clasificador Catastral (Cadastral Classifier).

Previamente al resto de análisis, se condujo un análisis exploratorio de los datos. Durante el mismo, se analizó si las variables presentaban una distribución normal y se buscaron valores atípicos. El nivel de adecuación de la matriz de correlaciones para realizar el análisis factorial se analizó a través de la prueba Kaiser Meyer Olkin, estableciéndose 0,60 como valor mínimo para considerar el análisis viable (Mvududu & Sink, 2013).

2.3. Metodología

A partir de los porcentajes de ocupación de cada uso del suelo en las 72 ciudades, se realizó un análisis factorial para identificar un conjunto reducido de factores que permitiera explicar la mayor variabilidad posible, en relación con las características de composición de los usos del suelo de las ciudades (Aguilera-Benavente et al., 2014, Pascual-Rosa et al., 2019). Posteriormente, se obtuvieron las puntuaciones de cada ciudad para los factores seleccionados (DiStefano et al., 2009) y a partir de dichas puntuaciones, se realizó un análisis de conglomerados con la intención de agrupar aquellas ciudades que muestran una estructura similar en su composición de los usos del suelo. La figura 3 representa de manera sintética los análisis realizados, que se presentan de manera detallada en los epígrafes siguientes.

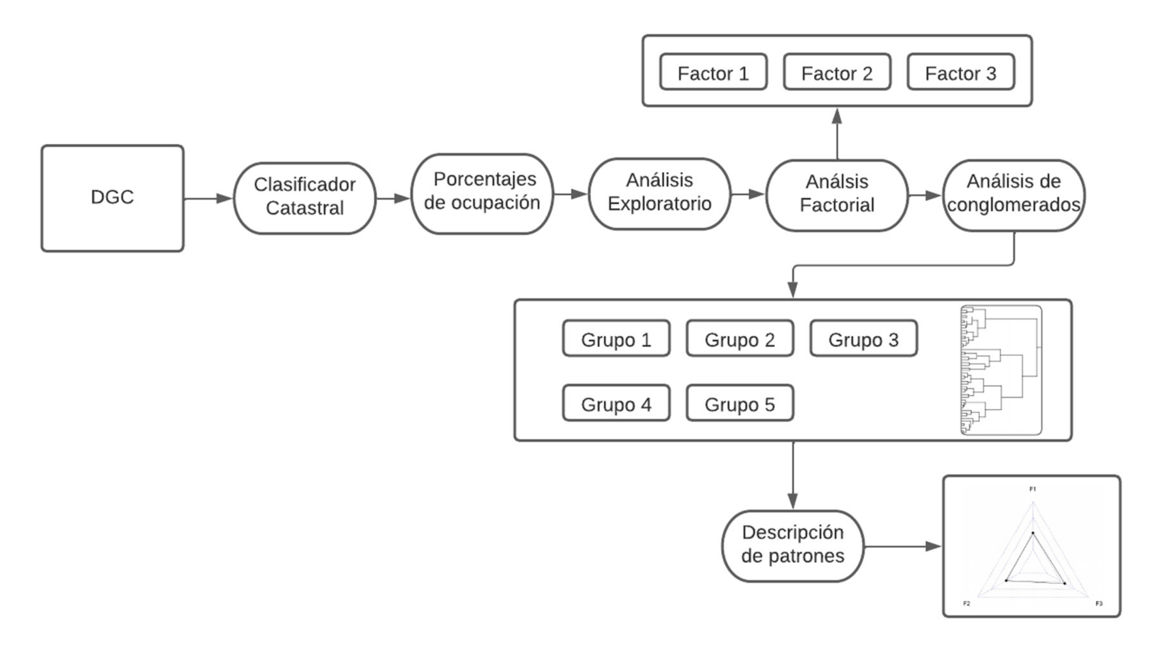


Figura 2. Esquema de la metodología del trabajo.

2.1.1. Análisis Factorial

De acuerdo con el análisis factorial, la correlación existente entre las distintas variables viene precedida por un factor común entre ellas que no es directamente medible, siendo la carga que presenta las variables una medida de la influencia que tiene el factor en su variabilidad (Cudeck, 2000). La aplicación del análisis en el presente estudio tiene como objetivo extraer aquellos factores que determinan la composición de usos del suelo de las ciudades españolas.

El análisis factorial se realizó utilizando la función “fa” de la librería “psych” de R. Para la elección de los factores se examinaron los resultados de múltiples configuraciones, seleccionando finalmente aquella que mejor se ajustaba tanto al conocimiento teórico como a la representación de la estructura subyacente de las observaciones y que, a su vez, era fácilmente interpretable. Las configuraciones exploradas consideraron 3 elementos fundamentales: el método de extracción de los factores, la rotación de los ejes y el número de factores retenidos. En lo que respecta al método de extracción de factores, se optó por emplear un método basado en mínimos cuadrados que se recomienda cuando el número de observaciones es pequeño (N < 100) y las variables no son normales (Watkins, 2021). Concretamente, se empleó Minres por ser un método ampliamente aceptado.

Para la rotación de los ejes, se exploraron tanto la rotación ortogonal como la oblicua. A este respecto, muchos autores sugieren que la oblicua es más precisa, ya que la mayoría de las variables están correlacionadas en alguna medida, y que la ortogonal únicamente debería aplicarse si la correlación entre factores

excediese 0,20 – 0,32 (Watkins, 2021). Considerando estos argumentos, se optó por una rotación oblicua, utilizándose el método Promax, al representar mejor la estructura de los datos.

Por último, para la selección del número de factores retenidos se consideraron: (1) las cargas salientes de las variables en los factores. El umbral de carga para considerar una variable como saliente en un factor fue de 0,45, este valor fue establecido considerando la significancia estadística y el número de observaciones (Norman & Streiner, 2014). (2) La correlación entre factores. (3) El ajuste residual de los modelos, evaluándose mediante la proporción de coeficientes residuales mayores a 0,05 y 0,10, y a través del error medio cuadrático (Watkins, 2021). (4) Se analizaron indicadores de sobrextracción o infraextracción de factores evaluándose modelos con extracción de 2, 3 y 4 factores, prestando atención a que las variables que cargaban en un único factor no fuesen divididas en varios (sobrextracción), que variables que no reflejasen un tema común cargasen en un solo factor y, a su vez, que estas no presentasen cargas en múltiples factores (infraextracción). Una vez obtenidos los factores, se obtuvo la puntuación de cada ciudad para cada uno de ellos. Para ello, cada variable fue escalada a valores entre 0 a 1, realizándose posteriormente una suma ponderada, utilizando como factor de ponderación el valor de las cargas en cada factor (DiStefano et al., 2009). La puntuación obtenida fue la métrica utilizada para el agrupamiento de las ciudades.

2.1.2. Análisis de conglomerados

Para el agrupamiento de las ciudades se realizó un análisis de conglomerados. Se utilizó un método jerárquico siguiendo el criterio de Ward (Aguilera-Benavente et al., 2014, Pascual-Rosa et al., 2019). El agrupamiento jerárquico es un método iterativo en el que se parte de un conjunto de conglomerados formados por una sola observación y se prueban todas las agrupaciones posibles, escogiendo aquella que mayor intercorrelación produce dentro del grupo, repitiéndose el proceso de forma secuencial hasta llegar a un único grupo formado por todas las observaciones. El agrupamiento se realizó mediante el software R, utilizando la librería “*stats”*, para lo que se generó la matriz de distancia euclidiana con la función “*dist”* y se realizó el agrupamiento con la función “*hclust”*.

El número de grupos asociados a la estructura de uso del suelo urbano en las distintas ciudades se estableció por medio del cálculo de 30 índices utilizando la función “*NbClust*” del paquete “*NbClust” en R*, y se evaluaron los resultados del análisis de conglomerados dentro del intervalo recomendado por los diferentes índices (2 – 6 agrupaciones). Para elegir el número de agrupaciones definitivo se tuvo en cuenta que el valor medio de los grupos en los factores siguiese un patrón distinto al resto, al mismo tiempo que el conjunto de grupos escogido fuese interpretable.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis Factorial

Los resultados del análisis exploratorio condujeron a excluir las ciudades de Málaga y Santa Coloma, debido a que presentaban valores atípicos en distintas variables, pudiendo comprometer análisis posteriores. Respecto a la matriz de correlaciones, los resultados mostraron que las variables observadas no presentaban correlaciones fuertes entre sí; sin embargo, el valor de KMO (0,68) indicó que el análisis era viable para su factorización.

El modelo con 2 factores presentaba indicios de infraextracción, agrupando usos del suelo que no presentaban un tema común y otros con cargas elevadas en varios factores. Por otro lado, el modelo con 4 factores exhibió indicios de sobrextracción, al presentar 2 factores con una única carga saliente y variables que reflejan un tema común cargando en distintos factores. Por su parte, el modelo con 3 factores presentaba varias cargas en cada factor y coherencia temática, cumpliendo el objetivo de obtener una estructura simple y explicativa. La evaluación de sus residuos mostró un RMSR aceptable (0,07) y, aunque los coeficientes de los residuos individuales no fueron del todo satisfactorios (35% > 0,05 y 10% > 0,10), la extracción de otro factor generaba los problemas ya descritos.

A partir de este análisis finalmente fue escogido el modelo con 3 factores, utilizando la extracción minres y la rotación promax. Los resultados del análisis: coeficientes factoriales, comunalidades y varianza, explicada por los factores, se muestran en la tabla 1. Las correlaciones entre los factores extraídos (Tabla 2) fueron bajas, por lo que presumiblemente la presencia de un factor no condiciona la presencia de otro. Con respecto a la varianza explicada (0,34) y las comunalidades, ambos parámetros fueron bajos, probablemente debido a las bajas correlaciones existentes entre las variables observadas.

Tabla 1. Factores extraídos durante el análisis factorial

	Factor 1	*Factor 2*	*Factor 3*	
% Varianza	0,14	0,12	0,08	*Comunalidad*
Comercio	0.08	**0.7**	0.04	0.527
Ed. Singulares	-0.04	-0.08	0.19	0.058
Eq. Educativos	0.29	0.01	0.13	0.096
Eq. Otros	0.36	0.37	0.05	0.369
Eq. Sanitarios	**0.50**	-0.05	0.00	0.237
Hostelería	0.27	-0.13	-0.32	0.149
Industrial	-0.17	-0.18	**0.44**	0.339
Indust. Mixto	0.21	-0.05	**0.5**	0.287
Ocio	0.04	**0.42**	-0.11	0.231
Oficinas	-0.11	**0.84**	0.11	0.593
Residencial Plur.	**0.68**	0.16	-0.03	0.591
Res. Plur. Mixto	**0.82**	0.01	-0.03	0.681
Residencial Unif.	-0.41	0.11	-0.66	0.57
Res. Unif. Mixto	0.00	-0.06	-0.18	0.029

Tabla 2. Correlación entre factores

	Factor 1	*Factor 2*	*Factor 3*
Factor 1	1		
Factor 2	0,43	1	
Factor 3	0,13	-0,15	1

Con respecto a la descripción de los factores, en el primer factor las variables que presentaban cargas salientes más altas fueron los usos Residenciales plurifamiliares y los Equipamientos sanitarios. Cabe destacar que, durante la exploración de los distintos modelos, se observó como en este factor también estaban presentes el resto de los usos relacionados con equipamientos. Por tanto, se ha considerado a este factor como el de los "usos asociados a la ciudad compacta", integrando residencias en altura y acceso a equipamientos públicos. El segundo factor, por su parte, se encuentra relacionado principalmente con los usos de oficinas (0,84), comercio (0,70) y ocio (0,42), lo que puede interpretarse como "usos asociados al sector terciario". Por último, el tercer factor se encuentra relacionado con los usos industriales (0,50 y 0,44), por lo que se ha interpretado como "usos vinculados a las actividades del sector secundario".

3.2. Análisis de conglomerados

El análisis permitió clasificar las 70 ciudades en 5 grupos, tras realizarse diversas pruebas considerando entre 2 y 6 grupos. La figura 4 muestra la media de las puntuaciones obtenidas para cada grupo en cada uno de los factores.

El primero de los grupos identificados se interpretó como "ciudades postindustriales". Este grupo presenta puntuaciones altas en los factores relacionados con usos de una ciudad compacta y actividades del sector terciario, y baja en el factor vinculado a la actividad industrial. En este grupo encontramos los principales focos históricos de desarrollo económico, todas ellas son ciudades portuarias: Barcelona, Valencia, Cádiz y Sevilla, a excepción de Madrid en cuyo desarrollo influye su condición de capitalidad del Estado. El segundo y tercer grupo se caracterizaban por ser ciudades de una alta actividad económica, presentando puntuaciones altas en los factores asociados a actividades del sector secundario y terciario, y diferenciándose entre sí por la mayor presencia de usos asociados a una ciudad compacta. En base a esto, el grupo dos quedó caracterizado como "ciudades de alta actividad económica y compactas", mientras el grupo tres quedo caracterizado como "ciudades de alta actividad económica y poco compactas". El cuarto grupo quedó caracterizado como "ciudades equilibradas", puesto que presentaron valores más balanceados en los tres factores. Se trata en general de ciudades que no conforman espacios metropolitanos, por lo que aglutinan en un mismo municipio las diferentes funciones, encontrando como ejemplo característico la ciudad de Zaragoza.

El quinto y último grupo, corresponde a "ciudades no significadas en los factores retenidos", presentando los valores más bajos en todos los factores. Estas ciudades tienen poca área dedicada a actividades del sector secundario y terciario y presumiblemente su actividad económica es más dependiente del sector primario. La ciudad de Murcia puede ser un ejemplo de esta casuística.

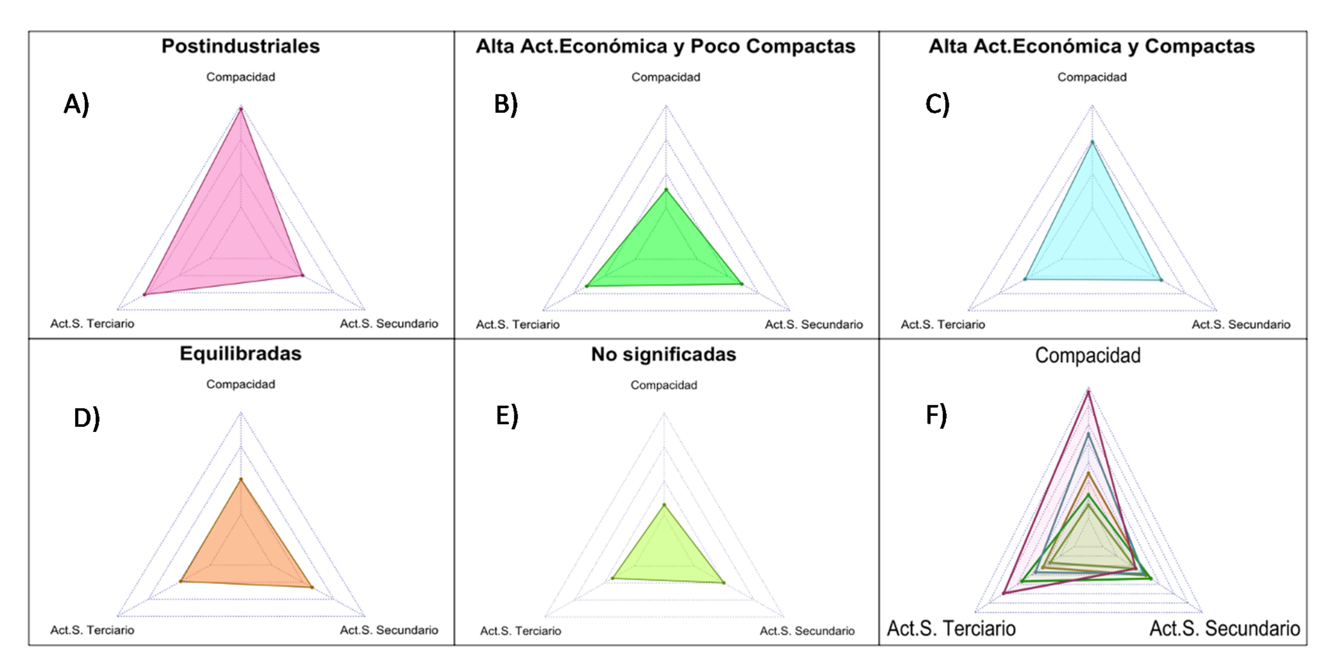


Figura 4. A) a E) Puntuación media de cada grupo en los factores. F) Puntuaciones medias de los 5 grupos analizados.

3. DISCUSIÓN

El presente estudio constituye un novedoso trabajo de clasificación de ciudades a partir del uso del suelo urbano utilizando la clasificación intermedia obtenida por medio del complemento de QGIS Clasificador Catastral (*cadastral classifier*). Esta clasificación se ha realizado por medio técnicas multivariantes, utilizando el análisis factorial para la reducción de variables y el análisis de conglomerados para el agrupamiento de las observaciones. A través del análisis factorial se pudo identificar 3 factores, en los que participaron 8 de las 14 categorías de uso de suelo, que explicaban el 34% de la varianza. Los factores fueron interpretados como "usos asociados a la ciudad compacta", "usos asociados al sector terciario" y "usos asociados al sector secundario". En base a los resultados del análisis factorial, se pudo determinar que los usos del suelo que más determinan la variabilidad de las ciudades son los usos Residenciales Plurifamiliares, Equipamientos Sanitarios, Ocio y espectáculos, Comercio, Oficinas e Industriales.

A través de los factores identificados se pudo extraer información sobre el nivel de desarrollo de la actividad económica de las distintas ciudades (factores de desarrollo económico asociados al sector secundario y terciario) y, adicionalmente, se pudo extraer información de la estructura espacial de las mismas (a partir del factor de compacidad) como refleja Schwartz et al. (2010), al relacionar la abundancia de residencias plurifamiliares con la estructura compacta de las ciudades. Estos factores muestran un elemento diferenciador respecto a otros estudios; en concreto, aquellos que utilizan variables sociodemográficas (e.j. ocupación y empleo) para caracterizar la función económica de las ciudades (Freestone et al., 2003), así como aquellos que contemplan el análisis de la forma urbana a través de métricas del paisaje (Pascal et al., 2019, Schwarz et al., 2010, Aguilera-Benavente et al., 2014).

Con relación al análisis de conglomerados, el primer grupo identificado fue caracterizado como ciudades postindustriales al observarse que eran ciudades históricas, de gran importancia económica y densamente pobladas, cuya industria se ha deslocalizado a ciudades periféricas. Este hecho puede ser observado al analizar algunas de las ciudades de los grupos de alta actividad económica y poco compactas, en la que encontramos varias ciudades del corredor del Henares, periferia de la ciudad de Madrid. Un estudio de similares características realizado por Frenkel (2004), corrobora esta hipótesis al distinguir los usos asociados a una ciudad compacta (residencias y servicios) de los usos industriales, asociados a una mayor dispersión y menor presencia de áreas residenciales. En relación con el grupo formado por ciudades de alta actividad económica y compactas, encontramos un grupo más heterogéneo. Este grupo incluye a ciudades periféricas

de Barcelona (L'Hospitalet y Badalona), en los que la mayor presencia de usos asociados a una ciudad compacta puede deberse a la mayor compacidad del área metropolitana de Barcelona (Goerlich et al., 2017), así como ciudades aisladas que reflejan el comportamiento de las ciudades compactas, pero que su industria no se ha deslocalizado, como puede ser la ciudad de León. Esto es extensible a las ciudades equilibradas, representado generalmente por ciudades del interior, cuyo aislamiento evita una distribución de funciones. El quinto y último grupo quedo caracterizado como ciudades no significadas en los factores retenidos, cabe destacar que la presencia de una ciudad en este grupo puede ser debido a que exista una mayor prevalencia de residencias unifamiliares que en el resto de los grupos, por ejemplo, la ciudad de Marbella.

La varianza explicada por los factores extraídos durante el análisis factorial (34%) no fue del todo satisfactoria. Considerando que el análisis factorial está basado en la correlación entre las variables (Cudeck, 2000), no es sorprendente que la varianza explicada por el modelo fuera baja. En este sentido, y en lo que respecta a los datos de partida, se estableció como criterio de inclusión de las ciudades, a las capitales de provincia y aquellas con más de 100,000 habitantes, dando lugar a 70 observaciones (tras el descarte de los valores atípicos), lo que podría estar comprometiendo el resultado del análisis al tratarse de un escaso número de observaciones (Lindgard y Rowlinson, 2006). Futuros estudios podrían ampliar la muestra e incluir nuevas categorías uso del suelo, como también nuevas variables socioeconómicas y espaciales para mejorar la extracción de factores complejos que describan el comportamiento multidimensional de las ciudades.

4. CONCLUSIÓN

Esta investigación clasificó las ciudades españolas (capitales de provincia y ciudades de más de 100.000 habitantes) a partir de su composición de usos del suelo urbano, obtenida por medio del nuevo complemento de QGIS clasificador catastral. Esta clasificación representa uno de los pocos estudios realizados para clasificar ciudades a partir de datos de uso del suelo urbano. Los métodos multivariantes aplicados en este trabajo permitieron agrupar en 5 grupos un total de 70 ciudades españolas de más de 100.000 habitantes a partir de su composición de usos de suelo. El conjunto original de 14 categorías de uso del suelo fue reducido a tres factores que dieron cuenta de la función económica, pero también de la estructura espacial de las ciudades. Si bien los resultados del análisis factorial fueron de alcance estadístico limitado, la coherencia temática de los factores extraídos se consideró satisfactoria a pesar de la poca varianza explicada por el modelo. Los cinco grupos identificados contribuyen a construir una tipología de ciudades en España que permite identificar distintos grados de especialización con relación a su actividades económicas y estructura espacial, apoyando de esta manera los futuros procesos de planificación y el desarrollo de asentamientos urbanos.

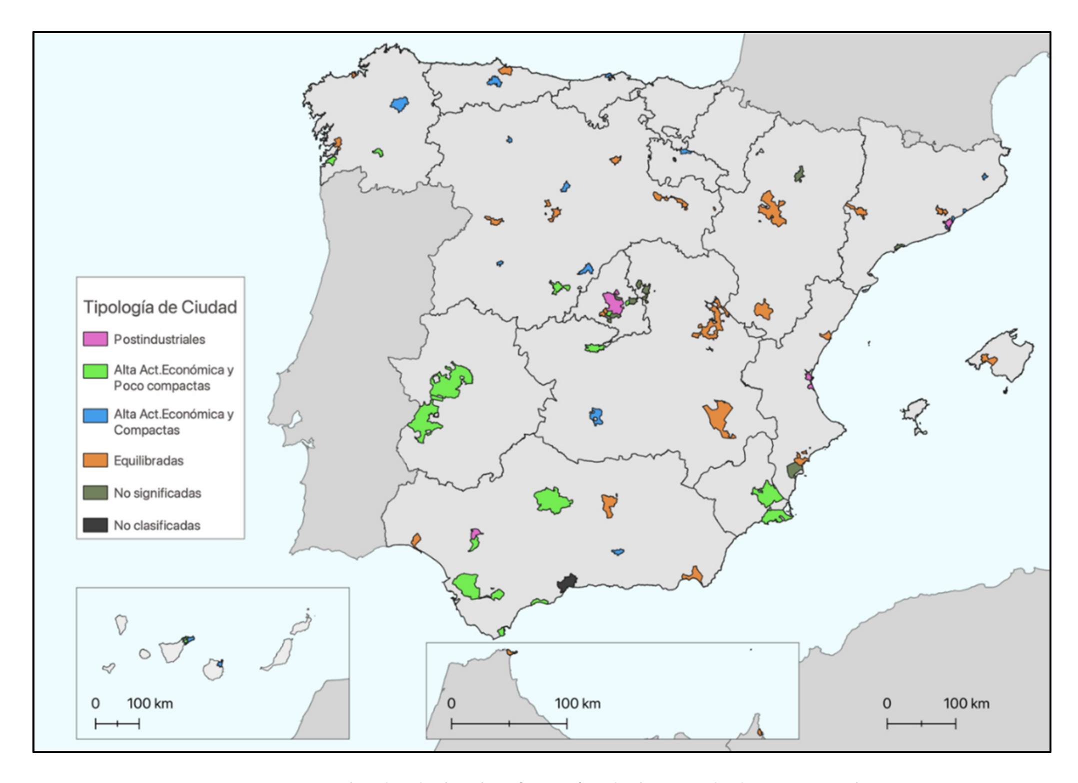


Figura 5. Resultado de la clasificación de las ciudades españolas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a los fondos del Programa de "Estímulo a la Excelencia de profesores Universitarios permanentes" (EPU-INV/2020/009) de la Comunidad de Madrid.

5. BIBLIOGRAFÍA

Aguilera-Benavente, F., Botequilha-Leitão, A. y Díaz-Varela, E. (2014). Detecting multi-scale urban growth patterns and processes in the Algarve region (Southern Portugal). *Applied Geography*, 53, 234-245. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.019

Anderson, J. R., Hardy, E. E., Roach, J. T. y Witmer, R. E. (1976). A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data. *Geological Survey.*

Bhuvandas, N., Vallabhbhai, S. y Aggarwal, V. (2012). Impacts of urbanisation on environment Analysis of trend of Extreme Daily Temperature of Abu Dhabi city, *UAE View project*. https://www.researchgate.net/publication/265216682

Cadenasso, M. L., Pickett, S. T. y Schwarz, K. (2007). Spatial heterogeneity in urban ecosystems: Reconceptualizing land cover and a framework for classification. *Front Ecol Environ,* 5(2), 80-88.

Cudeck, R. (2000). Exploratory factor analysis. En H. E. A. Tinsley y S. D. Brown (Eds.), *Handbook of applied multivariate statistics and mathematical modeling* (pp. 265–296). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-012691360-6/50011-2

DGC. (2022). Sede Electrónica del Catastro. Dirección General Del Catastro. http://www.sedecatastro.gob.es/

DiStefano, C., Zhu, M. y Mindrila, D. (2009). Understanding and using factor scores: Considerations for the applied researcher. *Practical Assessment, Research & Evaluation,* 14(20), 1–11. https://doi.org/10.7275/da8t-4g52

Freestone, R., Murphy, P. y Jenner, A. (2003). THE FUNCTIONS OF AUSTRALIAN TOWNS, REVISITED. En *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie-2003* (Vol. 94, Número 2, pp. 188-204).

Frenkel, A. (2004). Land-Use Patterns in the Classification of Cities: The Israeli Case. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(5), 711-730. https://doi.org/10.1068/b3066

Goerlich, G., Cantarino, I. & Eric Gielen (2017): Clustering cities through urban metrics analysis, Journal of Urban Design, DOI: 10.1080/13574809.2017.1305882Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J. y Anderson, R. E. (2019). MULTIVARIATE DATA ANALYSIS EIGHTH EDITION. www.cengage.com/highered

Harris, C. D. (1943). A Functional Classification of Cities in the United States. *Geographical Review*, 33(1), 86-99.

Huang, J., Lu, X. X. y Sellers, J. M. (2007). A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. *Landscape and Urban Planning*, 82(4), 184-197. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.010

Kwan, M.-P., Chai, Y. y Tana. (2014). Reflections on the similarities and differences between Chinese and US cities. *Asian Geographer*, 31(2), 167-174. https://doi.org/10.1080/10225706.2014.950484

Lindgard, H. y Rowlinson, S. (2006). Sample size in factor analysis: Why size matters. https://www.researchgate.net/publication/238622991

Liu, Z., He, C., Zhou, Y. y Wu, J. (2014). How much of the world's land has been urbanized, really? A hierarchical framework for avoiding confusion. *Landscape Ecology*, 29(5), 763-771. https://doi.org/10.1007/s10980-014-0034-y

Martín-Jiménez, J. M. y Rodriguez-Espinosa, V. M. (2022). Sistematización de la información de Catastro utilizando PostgreSQL-PostGIS. Aplicación al análisis de usos del suelo urbano en Alcalá de Henares, España. *Estudios Geográficos*, 83(292). https://doi.org/10.3989/estgeogr.2022106.106

Mvududu, N. H. y Sink, C. A. (2013). Factor Analysis in Counseling Research and Practice. *Counseling Outcome Research and Evaluation*, 4(2), 75-98. https://doi.org/10.1177/2150137813494766

Norman, G. R. y Streiner, D. L. (2014). *BIOSTATISTICS. The Bare Essentials*.

Radwann, T. M., Blackburn, G. A., Whyatt, J. D. y Atkinson, P. M. (2021). Global land trajectories and transitions. *Nature*, Sci Rep, 11(12814). https://doi.org/10.1038/s41598-021-92256-2

Pascual-Rosa, V. P., Aguilera-Benavente, F. y García, M. J. S. (2019). Clasificación y análisis de los procesos de cambio en la forma urbana de las áreas metropolitanas españolas: Aplicación de métricas espaciales. *Estudios Geográficos*, 80(286), 006. https://doi.org/10.3989/estgeogr.201926.006

Ritchie, H. and Roser, M. (2018) - "Urbanization". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/urbanization' [Online Resource]

Shurupov, N., Molinero-Parejo, R., Rodriguez-Espinosa, V. M. y Aguilera-Benavente, F. (2022). Clasificador Catastral: complemento de QGIS para la clasificación de los usos del suelo urbano a nivel de parcela. En Revisión.

Schwarz, N. (2010). Urban form revisited-Selecting indicators for characterising European cities. *Landscape and Urban Planning*, 96(1), 29-47. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.01.007

Song, X.-P., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Potapov, P. V., Tyukavina, A., Vermote, E. F. y Townshend, J. R. (2018). Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 560, 639-643.

Turner, M. G. (1990). Spatial and temporal analysis of landscape patterns. *Landscape Ecology,* 4(1), 21-30.

Vlahov, D. y Galea, S. (2002). Urbanization, Urbanicity, and Health. *Journal of Urban Health: Bulletin of the New York Academy of Medicine*, 79(4).

Watkins, M. W. (2020). A Step-by-Step Guide to Exploratory Factor Analysis with R and RStudio. In A Step-by-Step Guide to Exploratory Factor Analysis with R and RStudio. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781003120001



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 451-460

¿Dónde invertir a través del Método LEADER en Extremadura? Una propuesta metodológica para ayuda a las decisiones territoriales

G. Cárdenas Alonso[1], A. Nieto Masot[1]

[1] Departamento de Arte y Ciencias del Territorio, Universidad de Extremadura, Cáceres 10071, España.

gemacardenas@unex.es, ananieto@unex.es

RESUMEN: El FEADER y, concretamente, el Método LEADER desde hace más de 30 años, vienen siendo herramientas clave en el desarrollo endógeno, local, participativo y sostenible de las áreas rurales europeas más desfavorecidas en términos demográficos y socioeconómicos y, a pesar de la incuestionable labor de la política de desarrollo rural y de los Grupos de Acción Local, diversos autores, tanto a nivel europeo, como a nivel nacional, en España, concluyen que las mayores inversiones y el mayor número de proyectos a través de LEADER se ha concentrado en las áreas rurales más pobladas y con mayor desarrollo, es decir, se experimenta una discriminación positiva hacia ellas en la gestión de ayudas al desarrollo rural. Conociendo esto y según los objetivos que se persiguen por LEADER, se pretende analizar la situación en Extremadura, beneficiaria desde los inicios, a través de un Análisis Multicriterio de Superposición Ponderada con un SIG, tras un Proceso Analítico Jerárquico, que dé como resultado una herramienta que ayude en la decisión de priorizar territorialmente las ayudas LEADER en Extremadura. Así, se podrá determinar cuáles son los municipios más convenientes para recibir las ayudas al desarrollo rural por poseer características como una menor población, bajo crecimiento demográfico, baja tasa de natalidad, alta tasa de mortalidad, elevado envejecimiento de la población, bajo índice de productividad, altas tasas de paro, baja accesibilidad a los núcleos urbanos y bajas inversiones de LEADER durante los últimos años.

Palabras-clave: Método de asignación territorial de recursos económicos, Análisis multicriterio, Desarrollo Rural, Proceso Analítico Jerárquico, LEADER.

1. INTRODUCCIÓN

En 1991 surge la Iniciativa Europea LEADER, ejecutada bajo un modelo de desarrollo rural integrado, endógeno e innovador con el que se busca el desarrollo de las zonas rurales europeas por medio de su diversificación económica, teniendo en cuenta las características y necesidades del territorio de actuación y de la población que lo habita, y de la explotación de sus recursos endógenos (Nieto y Cárdenas, 2015). Se trata del Método LEADER, el cual comenzó siendo la base de un proyecto piloto con el que experimentar y pasó a ser un eje de actuación propio de la Política de Desarrollo Rural 15 años después, siguiendo su funcionamiento, a través de la gestión de los Grupos de Acción Local (GAL), (Cárdenas y Nieto, 2020). Así, regiones europeas rurales como la que este trabajo ocupa, Extremadura, vienen siendo beneficiarias desde hace más de 30 años de un modelo de desarrollo innovador y alternativo al tradicional de gestión de ayudas públicas al incorporar a la población local en la toma de decisiones y en el diseño de las estrategias.

Los beneficios generados por LEADER son incontables (Cejudo y Navarro, 2009; Navarro, Cejudo y Maroto, 2014; Nieto y Cárdenas, 2018), sin embargo, hay regiones, como Extremadura que, a pesar de su larga trayectoria como subsidiaria de las ayudas al desarrollo rural, tiene zonas rurales que se sitúan entre las más envejecidas y despobladas de España, su PIB es aún inferior al 75% de la media europea y presenta datos socioeconómicos inferiores a las regiones españolas más dinámicas (Brezzi, Dijkstra y Ruiz, 2011). Es cierto que, desde los años 80, la población extremeña se ha ido estabilizando en sus lugares de origen, sin embargo, el crecimiento demográfico y económico se limita a los núcleos localizados en áreas de regadío, en los urbanos y sus áreas de influencia y en algunos donde se explota un secano productivo de vid y olivo. En oposición, siguen teniendo pérdidas demográficas los que presentan menos población y envejecida, situados en las zonas de montaña, penillanura y zonas de secano y dehesas del sur de la provincia de Badajoz. Ante esto, diversos autores (Cárdenas y Nieto, 2017; Nieto y Cárdenas, 2015, 2018; Nieto, Cárdenas y Costa, 2019) afirman que en esta región aún existen zonas en las que los efectos de LEADER no están siendo los esperados.

Son aquellas caracterizadas por poseer un escaso tejido industrial y empresarial, por estar alejadas de los principales centros de población, ocio y consumo y, sobre todo, por las condiciones demográficas y sociales regresivas desde las que parten. Y es que, desde los inicios de LEADER, el mayor número de proyectos y con las mayores inversiones se aglutinan en las zonas rurales con mayor volumen de población y desarrollo, con un tejido empresarial autosuficiente y con capacidad de cofinanciar proyectos. Se trata, principalmente, de las cabeceras comarcales de la región, por lo que, como afirman Nieto y Cárdenas (2018), en Extremadura existe una clara discriminación positiva de las ayudas al desarrollo rural hacia las zonas rurales más dinámicas demográfica y socioeconómicamente. Esta afirmación se ve apoyada, por ejemplo, por los resultados obtenidos en trabajos sobre la región de Andalucía (Cejudo, Cañete, Navarro y Capote, 2021; Cejudo, Navarro y Cañete, 2022), en el caso de España, o sobre otras regiones europeas (Black y Conway, 1996; Lukic y Obad, 2016). La mayor parte de los trabajos citados muestran, desde una perspectiva cuantitativa, dónde se localizan y concentran los fondos y dónde se pone en marcha el mayor número de proyectos, dejando en un segundo plano a aquellos municipios o comarcas, dependiendo de la escala, por los que menos se apuesta. De este modo, este trabajo aporta, para el caso de Extremadura, a qué municipios sí debieran ir las ayudas al desarrollo rural, esto es, desde una perspectiva geográfica, dónde debieran localizarse atendiendo al objetivo perseguido por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER): mejorar las condiciones socioeconómicas de las zonas rurales europeas de modo que se reduzcan, en lo posible, los procesos de envejecimiento y despoblación.

Así, la localización de las inversiones de LEADER debe considerar el análisis de diferentes variables que garanticen un impacto social y económico adecuado para el buen desarrollo y cobertura de la población rural que más necesita de este tipo de fondos y ayudas. En este sentido, se propone la implementación de métodos de análisis multicriterio y herramientas SIG que faciliten el análisis geográfico de una serie de variables seleccionadas y poder, de esta manera, tomar la mejor decisión de acuerdo con unos criterios establecidos para valorar en qué municipios extremeños es necesario apostar a través de LEADER. En definitiva, el objetivo de este trabajo es determinar cuáles son los municipios más convenientes o prioritarios para recibir las ayudas al desarrollo rural por poseer características regresivas como: una menor población, bajo crecimiento demográfico, baja tasa de natalidad, alta tasa de mortalidad, elevado envejecimiento de la población, bajo índice de productividad, altas tasas de paro, baja accesibilidad a los núcleos urbanos, bajas inversiones de LEADER y bajo número de proyectos ejecutados bajo este enfoque. Se llegará a él a través de la creación de un Modelo de Asignación Territorial como resultado de un Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) y, posteriormente, un Análisis Multicriterio de Superposición Ponderada (AMSP) en un SIG. Se generarán, así, información y herramientas que permiten dirigir los escasos recursos financiaros provenientes del FEADER a través de LEADER para fomentar un proceso de planificación del desarrollo de Extremadura.

La Evaluación Multicriterio (EMC) es un conjunto de técnicas empleadas en la decisión multidimensional y los modelos de evaluación (Barredo, Lavalle y Kasanko, 2005). Entre ellos, está el PAJ o Analytic Hierarchy Process (AHP), desarrollado a finales de los años 70 por Thomas L. Saaty y cuyo objetivo fue apoyar la reducción de armamento nuclear de la Unión Soviética y los EE. UU. (Wind y Saaty, 1980). Con el fin de estructurar y ordenar los procesos, este método desarrolla una estructura jerárquica para la toma de decisiones y permite escoger la mejor alternativa entre un conjunto de posibilidades en base a determinados criterios (Laffeuillade, Barragán, Geraldi y Arias, 2020). Así, el PAJ es considerado como un método de ponderación aceptado internacionalmente. Tradicionalmente, la EMC se ha aplicado al ámbito medioambiental (García, 2004; Iturralde Mota, 2017; Lamelas, 2014), ya que en este influyen multitud de factores. Pero esto ocurre, también, en ámbitos de índole social (Buzai, 2014) como es el desarrollo rural. Y es que la mayoría de los problemas sociales no tienen respuestas únicas, sino que se encuentran vinculadas entre sí y a lo que el investigador quiere buscar y ordenar. Destacan, así, trabajos en los que se determinan sitios óptimos de localización de actividades (Buzai, 2014; Luque, 2003), equipamientos públicos (Bosque et al., 2000; Bosque y García, 2000; Galacho y Arrebola, 2013; Luque, 2003) o para la ubicación de segundas residencias en el medio rural extremeño (Jeong et al., 2016). Presentando, también, a Extremadura como área de estudio, destaca el trabajo de González-Ramiro et al. (2016), en el que, a través del PAJ, determinan el potencial del turismo rural en la región. Interesante es la aplicación que hacen del proceso Guillén, Hernández y Sánchez (2020) con el fin de analizar la valorización de los destinos turísticos extremeños.

El desarrollo de la metodología de evaluación multicriterio y de las TIG ha llevado a la búsqueda de la combinación de ambas, existiendo interesantes herramientas SIG de gran utilidad (Buzai et al., 2015) en temas medioambientales, económicos, sociales, sanitarios, etc., como es el caso del AMSP, en entorno ráster. En esta combinación de la evaluación multicriterio y los SIG, adquieren relevancia los estudios dedicados a la toma de decisiones en el territorio, sobre todo para solucionar problemas en las áreas urbanas (De Cos, 2007;

Palma, 2015). De este modo, aunque a lo largo de los años se ha afianzado el empleo de evaluaciones multicriterio y su desarrollo a través del SIG en el campo social o de la Geografía Humana, en el caso del desarrollo rural se considera novedoso, ya que ha sido analizado, generalmente, desde una perspectiva cuantitativa pero descriptiva.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

El área de estudio de este trabajo es la región española de Extremadura. Situada en el suroeste de España, se caracteriza, principalmente, por ser un territorio demográficamente disperso a pesar de su situación estratégica en el eje creado por las tres grandes áreas metropolitanas de la Península Ibérica (Cárdenas y Nieto, 2020). En el conjunto español, Extremadura forma parte de las regiones con la economía menos diversificada y activa, junto a Castilla-La Mancha, Castilla y León, Andalucía y Galicia, y que son consideradas "la España rural". Y es que, con una superficie de 40.000 km2, Extremadura posee una población de poco más de 1.000.000 habitantes distribuidos por 388 municipios, por lo que su densidad de población ronda los 27 hab/km2. La mayor parte de la población extremeña se concentra en las principales ciudades: Badajoz, Cáceres, Mérida y Plasencia. Los intensos movimientos migratorios tras la Guerra Civil española han condicionado, sin duda, la demografía de la región y aún hoy son palpables sus consecuencias, agravadas por las diversas crisis económicas sufridas en las últimas décadas. Extremadura presenta un grave problema de envejecimiento en sus municipios más ruralizados, que ocupan las áreas situadas en las zonas de montaña, las zonas limítrofes de la región y son los que más desconectados están de los principales ejes de articulación con el resto de España.

Desde el punto de vista económico, según la serie 2000-2020 de la Contabilidad regional de España del INE, el PIB per cápita de Extremadura fue del 63,5% de la media nacional en el año 2000, alcanzando el 71% en el 2010. Después, los datos muestran un lento aumento, llegando al 72,8% en 2018 y siendo, en el año 2020, la región española que registró un menor descenso (-7,4%) respecto al año anterior (78,5% e 2019), con 18.301 euros por habitante, siendo de las regiones que menos ha estado afectada por la crisis del COVID-19 en sus ingresos, por ser, también, de las que menos genera y porque depende menos de los sectores más castigados como el turismo o la industria. Extremadura converge con el resto de CCAA españolas en términos económicos, pero a un ritmo muy lento y en continuo riesgo por el peligro de despoblamiento en las áreas más ruralizadas. En el año 2020, se situaba en el puesto 16 en PIB per cápita. Como principales características socioeconómicas de Extremadura, sobresale la aún alta representación del sector agrario en el PIB regional (aunque el sector terciario, con el comercio, el turismo y el transporte, es el que genera más empleo), las altas tasas de desempleo, la reducción del poder adquisitivo durante los últimos años, la baja productividad y el alto endeudamiento del sector público.

Además, Extremadura se caracteriza por presentar diversos territorios atendiendo a características físicas, económicas, sociales y demográficas. Por un lado, hay áreas con un buen nivel de desarrollo y con adecuados equipamientos, servicios e infraestructuras. Son aquellas que tienen un sector agroindustrial bastante moderno y competitivo, localizadas en las Vegas del Guadiana, Campo Arañuelo, Valle del Alagón y Tierra de Barros. Por otro lado, de manera opuesta, están las áreas más alejadas de los principales centros urbanos, con poca población y envejecida, así como deficiencias en términos de equipamientos e infraestructuras, en las que la competitividad del sector primario es difícil y no genera las rentas suficientes a su población. Estas áreas se ubican en las zonas montañosas del norte de Extremadura y en la penillanura, en la provincia cacereña, y en los límites de la pacense, sobre todo en el sur y sureste. Diversos autores, como Risco y De la Macorra (2006) y Cayetano (2006), consideran que el escaso desarrollo socioeconómico de Extremadura se debe, principalmente, a la inadecuada explotación de sus tierras, a la poca transformación de su materia prima, al subdesarrollo de sus infraestructuras, a la poca población y a la baja densidad demográfica. Así, conociendo esta situación, es evidente que Extremadura haya sido beneficiaria de LEADER desde los inicios, con 24 Grupos de Acción Local trabajando por el desarrollo de la región.

2.2. Proceso metodológico

En la Figura 1 se presenta el proceso metodológico seguido en este trabajo. En primer lugar, se han seleccionado 10 variables para las que se han establecido 5 rangos. Las variables, en formato vectorial a nivel municipal, han sido posteriormente recalculadas y rasterizadas en el SIG en base a los 5 rangos estipulados y que se corresponden con zonas óptimas (valor 1), muy adecuadas (valor 2), adecuadas (valor 3), aceptables (valor 4) e inaceptables (valor 5), teniendo en cuenta que, por ejemplo, mientras menor población tiene un

municipio, más óptimo es para localizar en él las inversiones de LEADER, o mientras mayor es la tasa de natalidad de un municipio, más inaceptablemente será valorado. Posteriormente, antes de llevar cabo el AMSP a través del SIG, se han calculado la Matriz de Comparación por Pares (MCP) y el Vector de Prioridad (VP) en el marco del PAJ de Saaty con el fin de establecer las ponderaciones oportunas a cada una de las variables/factores. Como resultado, se obtiene el Modelo de Asignación Territorial de Inversiones LEADER en Extremadura.

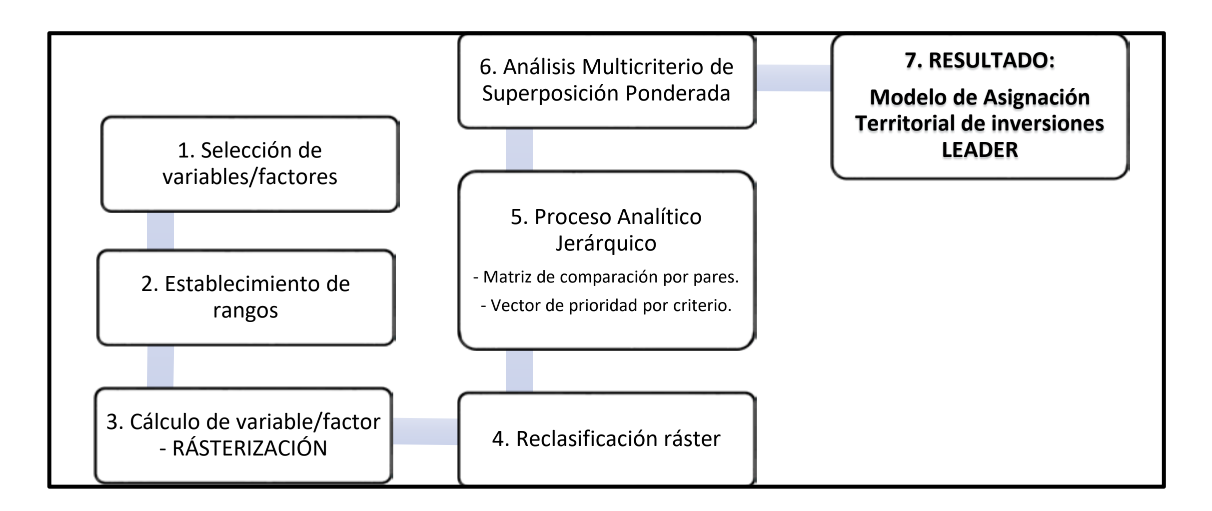


Figura 1. Proceso metodológico.

2.1.1. Selección de variables/criterios y fuentes de información

Atendiendo a estudios previos (Cañete et al., 2017; Cárdenas y Nieto, 2017; Cejudo et al., 2021, 2022; Marsden y Sonnino, 2008; Nieto et al., 2019), conociendo las características geográficas de Extremadura (Cayetano, 2006; García y Nieto, 2015; González, 2006; Gurría, 2007; Leco, Pérez y Mateos, 2017) relacionadas con el desarrollo rural y LEADER y los objetivos perseguidos por el FEADER (Moyano, 2018; Nieto y Cárdenas, 2015), las variables seleccionadas para calcular el Modelo de Asignación Territorial de las ayudas LEADER y las características a valorar óptimamente en la construcción del modelo son (Tabla 1):

Tabla 1. Variables seleccionadas y característica a valorar prioritariamente

VARIABLE	*CARACTERÍSTICA PARA VALORAR ÓPTIMAMENTE*
% Población respecto al total Extremadura (promedio 2007-2020)	Menor población
% Crecimiento de la Población (2007-2020)	Menor crecimiento de la población
Tasa de Natalidad (2007-2020)	Bajas tasas de natalidad
Tasa de Mortalidad (2007-2020)	Altas tasas de mortalidad
Índice de Envejecimiento (2007-2020)	Alto índice de envejecimiento
índice de Productividad (2007-2020)	Bajo índice de productividad
Tasa de Paro (2007-2020)	Altas tasas de paro
Accesibilidad a núcleos urbanos	Baja accesibilidad a núcleos urbanos
% Inversión total LEADER respecto al total de inversión en Extremadura (2007-2013)	Bajas inversiones de LEADER
Nº de proyectos de LEADER (2007-2013)	Bajo número de proyectos

Como se puede observar en la tabla anterior, se analiza el periodo 2007-2020, es decir, desde la perspectiva del Desarrollo Rural, se ha tomado como referencia el periodo de programación 2007-2013, por ser el último del que se disponen los datos de inversiones y proyectos de manera detallada a nivel municipal gracias a la colaboración de la Secretaría General de Población y Desarrollo Rural de la Consejería de Agricultura, Desarrollo Rural, Población y Territorio de la Junta de Extremadura. Así, para las variables demográficas,

cuya fuente es el Instituto Nacional de Estadística (INE), se ha calculado el valor promedio hasta el año 2020, con el fin de analizar la influencia de las actuaciones de LEADER 2007-2013 más allá de su funcionamiento, y de igual manera para las variables de índole económica, como la Tasa de Paro y el Índice de Productividad, cuya fuente es el Atlas Socioeconómico de Extremadura (2009-2021).

Todas las variables han sido asignadas, después, a una cartografía con base municipal de Extremadura cuya fuente es la Base Cartográfica Nacional a escala 1:200.000 con el fin de procesarla posteriormente en un SIG, concretamente, ArcGIS Pro.

2.1.2. Proceso de Análisis Jerárquico

El PAJ fue desarrollado a finales de los 70 del siglo pasado por Thomas L. Saaty (Wind y Saaty, 1980) con el objetivo de apoyar la reducción del armamento nuclear de la URSS y los EEUU, si bien, a pesar de los años, su impacto ha sido significativo, tanto a nivel teórico como aplicado, hasta la actualidad. Saaty propuso desarrollar una estructura jerárquica del problema de decisión para estructurar y ordenar todo el proceso. Así, este lo diseñó para cuantificar juicios u opiniones sobre la importancia relativa de cada uno de los criterios en conflicto empleados en la toma de decisión (Pinzón, 2015). La metodología propone, en primer lugar, descomponer el Problema de Decisión en una jerarquía de elementos interrelacionados, identificando: (1) el Objetivo General, (2) los Criterios, (3) las alternativas posibles. Para el caso de este trabajo, el Problema de Decisión viene definido por la siguiente estructura jerárquica:

(1) Objetivo general: Municipios más convenientes para la localización de las inversiones de LEADER.

(2) Criterios: basados en las características demográficas y socioeconómicas de Extremadura y el funcionamiento y los resultados de LEADER en sus municipios.

(3) Subcriterios: Porcentaje de población; Crecimiento de la población; Tasa de natalidad; tasa de mortalidad; Índice de envejecimiento; Índice de Productividad; Tasa de paro; Accesibilidad a núcleos urbanos; Inversión de LEADER; número de proyectos de LEADER.

(4) Alternativas: localización óptima, localización muy adecuada, localización adecuada, localización aceptable y localización inaceptable.

Una vez establecida la estructura jerárquica del Problema de Decisión, se construye la MCP, la cual permite analizar el grado de importancia de cada subcriterio (variable o factor) con respecto a los demás. Este grado de importancia se forma a partir de una cuantificación o rating de importancia relativa entre los subcriterios considerados, basado en la metodología del PAJ de Saaty. Así, en base a la escala de importancia que se muestra en la Tabla 2, se construye, bajo criterio propio, la MCP con los 10 subcriterios.

Tabla 2. Rating de importancia para la construcción de la MCP

1 =	Si el criterio "x" es igualmente importante que el criterio "y"
2 =	Si el criterio "x" es a penas más importante que el criterio "y"
5 =	Si el criterio "x" es bastante más importante que el criterio "y"
7 =	Si el criterio "x" es mucho más importante que el criterio "y"
9 =	Si el criterio "x" es absolutamente más importante que el criterio "y"

Seguidamente, una vez calculados los valores numéricos de la MCP, según el PAJ, se mide el VP de la matriz, el cual proporciona la ponderación de cada uno de los subcriterios, es decir, los componentes del VP de la MCP representan los pesos ponderados que tiene cada una de las variables sobre la toma de decisión final y con el que se llevará cabo, con álgebra de mapas, la superposición ponderada en el SIG. Para calcular el VP de una matriz es necesario, previamente, generar la Matriz de Comparación por Pares Normalizada (MCPN) (Tabla 3).

Después de construir la MCPN, se procede a generar el VP de cada subcriterio o variable. Este se determina a partir de la suma ponderada de cada fila de la matriz y su promedio. El resultado se muestra en la Tabla 4.

Una vez obtenida la ponderación de cada subcriterio, es necesario realizar una evaluación de los resultados obtenidos. Para esto, Saaty, dentro de la metodología del PAJ, propone el cálculo de la Razón de Consistencia (RC) de la matriz a partir de su Índice de Consistencia (IC) y del Índice de Consistencia Aleatorio (ICA). La RC determina si la matriz es consistente o inconsistente y si los resultados obtenidos en el VP (los

pesos ponderados) son adecuados o si se deben hacer ajustes en la matriz de comparación, para optimar los resultados. Según la metodología PAJ, los valores de RC que exceden 0,10 son señal de juicios inconsistentes, así como si son ≤ a 0,10 (para matrices mayores de 5x5) el juicio es aceptable. Así, para la MCP construida en este trabajo, la RC es 0,072, por lo que es muy aceptable, teniendo en cuenta que es una matriz de tamaño 10x10. De este modo, se validan los resultados del análisis matricial y del VP.

Tabla 3. Matriz de Comparación por Pares Normalizada

	% Población	*% Crecimiento de la Población*	*T. Natalidad*	*T. Mortalidad*	*I. Envejecimiento*	*I. Productividad*	*Tasa de Paro*	*Accesibilidad*	*Inversión LEADER*	*Proyectos LEADER*
% Población	0,03	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02	0,05	0,04	0,04
% Crecimiento de la Población	0,15	0,04	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,13	0,04	0,04
T. Natalidad	0,15	0,09	0,05	0,08	0,03	0,02	0,02	0,05	0,04	0,04
T. Mortalidad	0,15	0,22	0,09	0,16	0,29	0,08	0,07	0,13	0,14	0,16
I. Envejecimiento	0,15	0,22	0,23	0,08	0,15	0,29	0,25	0,13	0,14	0,16
I. Productividad	0,06	0,09	0,09	0,08	0,02	0,04	0,07	0,13	0,01	0,02
Tasa de Paro	0,06	0,09	0,09	0,08	0,02	0,02	0,04	0,05	0,01	0,02
Accesibilidad	0,15	0,09	0,23	0,31	0,29	0,08	0,18	0,25	0,36	0,40
Inversión LEADER	0,06	0,09	0,09	0,08	0,07	0,21	0,18	0,05	0,07	0,04
Proyectos LEADER	0,06	0,09	0,09	0,08	0,07	0,21	0,18	0,05	0,14	0,08

Tabla 4. Vector de Prioridad para los subcriterios

Subcriterio	*Ponderación*	*Porcentaje*
% Población	0,03	3
% Crecimiento de la Población	0,05	5
T. Natalidad	0,06	6
T. Mortalidad	0,15	15
I. Envejecimiento	0,18	18
I. Productividad	0,06	6
Tasa de Paro	0,05	5
Accesibilidad	0,23	23
Inversión LEADER	0,09	9
Proyectos LEADER	0,10	10

2.1.3. Análisis Multicriterio de Superposición Ponderada

Teniendo generadas y reclasificadas las variables en formato ráster atendiendo a la escala numérica que representa a los 5 rangos establecidos o alternativas (Tabla 2) y tras el cálculo de ponderación o peso de cada una, se lleva cabo el álgebra de mapas en el SIG a través del AMSP con la herramienta Weigthed Overlay en ArcGIS Pro. Tal y como se pretende en este trabajo, la superposición ponderada permite realizar evaluaciones multicriterio para resolver problemas de decisión en los que intervienen varios factores que, además, tendrán distintas valoraciones, pero en un SIG con una sola herramienta. Esta combina los siguientes pasos:

(1) Reclasifica los valores en los ráster de entrada en una escala de evaluación común de adecuación o preferencia, riesgo o algo similar a una escala unificadora (escala creada con los 5 rangos); (2) Multiplica los valores de celda de cada ráster de entrada por el peso de importancia de ellos (ponderaciones establecidas a partir de los vectores de prioridad del análisis jerárquico); (3) Suma los valores de celda resultados para producir el ráster de salida. Respecto a los valores de salida, hay que tener en cuenta que, en este caso, valores altos (en una escala de 1 a 5) indican que la ubicación es inadecuada y valores bajos que la ubicación es muy adecuada u óptima.

3. RESULTADOS

Tras el proceso metodológico anteriormente descrito, se obtiene, como resultado, el Modelo de Asignación Territorial de inversiones LEADER en Extremadura (Figura 2), en el que aparecen los municipios de la región atendiendo a su valor como zona Óptima, Muy Adecuada, Adecuada, Aceptable o Inaceptable y, por lo tanto, qué municipios presentan los peores datos en cuanto a población total, crecimiento de la población, tasas de natalidad y mortalidad, índices de envejecimiento y productividad, tasa de paro, accesibilidad a los núcleos urbanos e inversiones y proyectos LEADER, y al contrario. En la siguiente tabla (Tabla 5) se aporta el número de municipios en cada categoría o alternativa del modelo.

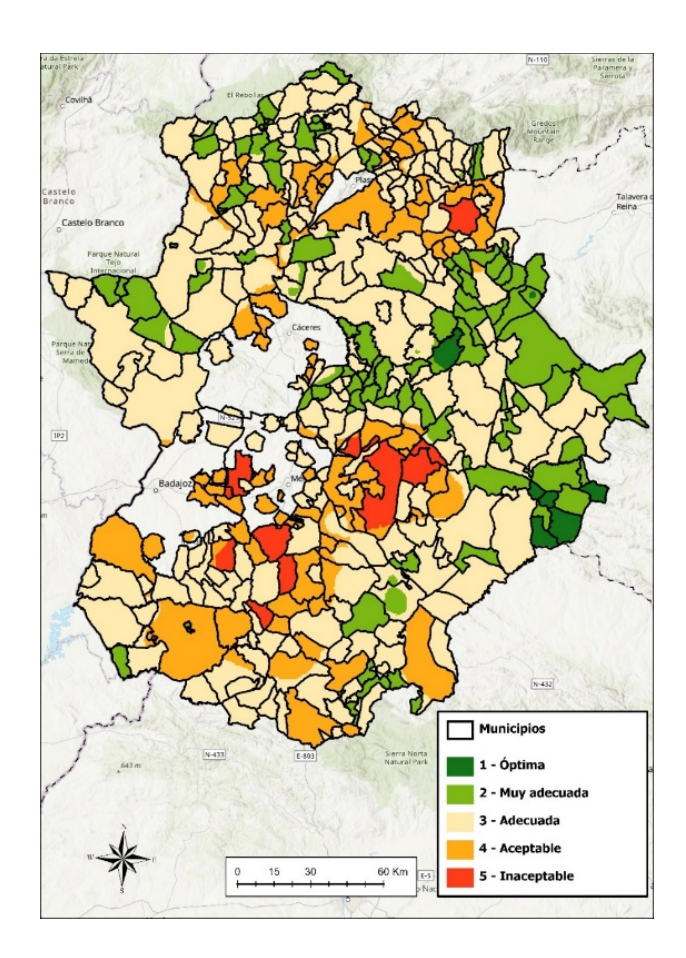


Figura 2. Modelo de Asignación Territorial de inversiones LEADER en Extremadura

Tabla 5. Número de municipios por categorías o alternativas

ZONAS	*Nº de municipios*	*% de municipios*
Óptimas	6	1,56
Muy adecuadas	84	21,88
Adecuadas	214	55,73
Aceptables	71	18,49
Inaceptables	9	2,34

Los municipios extremeños, por sus regresivas situaciones demográficas y socioeconómicas y por ser los que menos inversiones han recibido de LEADER en el periodo 2007-2013, que son prioritarios para recibir las ayudas al desarrollo rural son seis, estos son: Zarza-Capilla, Capilla, Sancti-Spiritu, Risco, Baterno y Garciaz, representando el 1,56% de los municipios de la región. Junto a ellos, son destacables, y para tener en cuenta, los 84 municipios resultantes como muy adecuados, también con características desfavorables, sin olvidar al 55,73% que aparecen como adecuados. En total, serían 304 los municipios por los que convendría apostar en cuanto a la estrategia de desarrollo de Extremadura, pero haciendo hincapié en los que peor situación presentan. Los seis óptimos tienen, durante el periodo analizado, una población inferior a 1.000 habitantes (Risco 154), crecimiento de la población negativo (en torno al -20%), tasas de natalidad por debajo del 4‰ y de mortalidad entre el 15-20‰, índices de envejecimiento entre 500-1000, índices de productividad inferiores a 90 (el mayor valor de la región es 9.453, en Belvís de Monroy, en Cáceres), tasas de paro en torno al 15-20%, más de 40 minutos de viaje a los núcleos urbanos (excepto Garciaz, los 5 municipios restantes pertenecen a La Siberia, en el límite este de la región) y una media de 3 proyectos subvencionados en todo el periodo 2007-2013 con una inversión de 42.300 euros, si bien, Risco y Capilla no recibieron ninguna ayuda y en Miajadas, por ejemplo, se gestionaron más de 5.000.000 euros.

De manera opuesta, hay 9 municipios valorados como inaceptables (Almendralejo, Don Benito, Montijo, Navalmoral de la Mata, Puebla de la Calzada, Santa Marte de los Barros, Villafranca de los Barros, Villanueva de la Serena y Zafra) y que se sitúan a la cabeza, sobre todo, en número de proyectos subvencionados por el FEADER y con grandes cuantías y localizados en torno a las principales vías de comunicación extremeñas. Son los principales núcleos de población de la región y cabeceras comarcales.

Así, a través del modelo obtenido, se obtiene de manera específica qué municipios deben ser beneficiarios de mayores ayudas al desarrollo rural, dado que, a lo largo de los pasados años, han ido destinadas a aquellos que por sus características demográficas y socioeconómicas menos lo necesitaban.

4. CONCLUSIONES

Extremadura, a lo largo de los años en los que viene siendo beneficiaria de las ayudas europeas al desarrollo rural, ha experimentado un desigual reparto de ellas, incluso habiéndose llevado a cabo cambios en los reglamentos en los sucesivos periodos de programación en busca de mejores estrategias y gestión de los fondos. Se puede considerar lógico y sostenible el hecho de que se genere más desarrollo a partir de los empresarios y emprendedores ya asentados en cada uno de los territorios, sin embargo, esto ocasiona que las inversiones se agrupen en zonas ya desarrolladas, dejando a un lado a los municipios que más necesitan de la implantación de nuevas actividades y de la diversificación de sus economías. A pesar de la gran labor de los GAL en el diseño de sus estrategias, finalmente, son los grupos “más poderosos”, los empresarios más solventes con experiencia previa, influencia y poder quienes dan forma a sus ideas. Por esto, estudios como este son necesarios, para dar a conocer no sólo a dónde y cómo van dirigidas las ayudas, si no a dónde no, ya que, teniendo en cuenta el objetivo perseguido por LEADER, es contradictorio el hecho de que aquellos municipios y comarcas extremeñas más ruralizadas y más desfavorecidas en términos demográficos y socioeconómicos sean las que menos apoyo reciben del FEADER.

Para saber cuáles son estos municipios, es necesario tener en cuenta las múltiples variables de las que debe depender la toma de decisiones en el diseño de estrategias de desarrollo y, en base a ellas, escoger los métodos más adecuados de análisis, como son los empleados en este trabajo: el Análisis de Evaluación Multicriterio a través del Proceso Analítico Jerárquico y Superposición Ponderada, tomando provecho, además, de todas las ventajas que facilita un SIG. Y es que los métodos multicriterio elegidos son una excelente herramienta que admiten su integración con instrumentos SIG, puesto que permiten estandarizar diferentes tipos de variables geográficas y una mayor integración que, de otra manera, no podrían tenerse en cuenta en la toma de decisiones con análisis espacial. Por último, el desarrollo, metodología y resultados de la investigación desarrollada demuestran que los métodos de análisis multicriterio trabajados juntamente con herramientas SIG de análisis espacial permiten obtener buenos y adecuados resultados, así como versátiles y adaptables a diversos ambientes, como es el social y el humano, también con problemas en los que intervienen múltiples variables, como es el desarrollo rural.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es posible gracias a la financiación de la ayuda GR21164 de la Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital de la Junta de Extremadura y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional.

BIBLIOGRAFÍA

Barredo, J. I., Lavalle, C. y Kasanko, M. (2005). Urban scenario modeling and forecast for sustainable urban and regional planning, *GIS for sustainable development* (349-366): CRC Press.

Bosque, J., Díaz, M. Á., Rodríguez, A. E. y Salado, M. J. (2000). La componente geográfica en la percepción pública de las actividades no deseadas: las instalaciones para el tratamiento de residuos en el área metropolitana de Madrid. *En Lecturas geográficas. Homenaje a José Estebanez Álvarez*. LIBRO: Editorial complutense, Madrid, 1015-1028.

Bosque, J. B. y García, R. C. (2000). El uso de los sistemas de información geografica en la planificación territorial. *Anales de Geografia de la Universidad Complutense*, 20.

Buzai, G., Fuenzalida, M., Moreno, A. y García de León, A. (2015*). Potencialidad de la metodología de evaluación multicriterio aplicada con sistemas de información geográfica*, Editorial Triángulo Santiago de Chile, 9-111.

Buzai, G. (2014). Evaluación multicriterio y análisis espacial de los servicios de salud: conceptos centrales y aplicaciones realizadas a la ciudad de Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina), *Anuario de la División Geografía*.

Cañete, J. A., Marilena, L., Cejudo, E., De Rubertis, S., Navarro, F. y Belliggiano, A. (2017). ¿La práctica del desarrollo rural genera desequilibrio territorial? El caso de leader en el sur de europa: Andalucía (España) y Puglia (Italia) 2007-2013). *Naturaleza, territorio y ciudad en un mundo global*-Congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles (Madrid, 25-27 de octubre de 2017).

Cárdenas, G. y Nieto, A. (2017). Towards Rural Sustainable Development? Contributions of the EAFRD 2007–2013 in Low Demographic Density Territories: The Case of Extremadura (SW Spain). *Sustainability*, 9(7), 1173, https://doi.org/10.3390/su9071173.

Cárdenas, G. y Nieto, A. (2020). El Enfoque LEADER en el nuevo FEADER 2014-2020 en Extremadura. *Cuadernos Geográficos*, 59(2), 5-26. doi: http://dx.doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.9384 .

Cárdenas, G. y Nieto, A. (2020). Rural Space Governance in Extremadura (SW Spain). Analysis of the Leader Approach. *European Countryside*, 12(4), 448-468, https://doi.org/10.2478/euco-2020-0024 .

Cayetano, M. (2006). Extremadura y Alentejo: Del subdesarrollo heredado a los retos del futuro. *Revista de Estudios Extremeños*, 62(3), 1167-1188.

Cejudo, E., Cañete, J. A., Navarro, F. A. y Capote, A. (2021). Fracaso en la implementación de los proyectos Leader en el rural profundo de Andalucía (España): juventud y mujer. *Ager: Revista de estudios sobre despoblación y desarrollo rural* - Journal of depopulation and rural development studies(33), 249-278, https://doi.org/10.4422/ager.2021.13.

Cejudo, E. y Navarro, F. A. (2009). La inversión en los programas de desarrollo rural. Su reparto territorial en la provincia de Granada. *Anales de Geografia de la Universidad Complutense*, 29(2), 27.

Cejudo, E., Navarro, F. A. y Cañete, J. A. (2022). Who Decides and Who Invests? The Role of the Public, Private and Third Sectors in Rural Development according to Geographical Contexts: The LEADER Approach in Andalusia, 2007–2015. *Sustainability*, 14(7), 3853, https://doi.org/10.3390/su14073853.

De Cos, O. (2007). SIG y evaluación multicriterio: propuesta metodológica para cuantificar el grado de metropolización en el territorio, *Mapping*, (116), 6-12.

Galacho, F. B. y Arrebola, J. A. (2013). Modelo de evaluación de la capacidad de acogida del territorio con SIG y técnicas de decisión multicriterio respecto a la implantación de edificaciones en espacios rurales, *Investigaciones Geográficas* (España), (60), 69-85, https://doi.org/10.14198/INGEO2013.60.04.

García, L. A. (2004). *Aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impactos ambientales*: Universitat Politècnica de Catalunya.

García, C. y Nieto, A. (2015). La organización de la atención sociosanitaria a las personas mayores en Extremadura. *Investigaciones geográficas* (63), 161-178, https://doi.org/10.14198/INGEO2015.63.11.

González-Ramiro, A., Gonçalves, G., Sánchez-Ríos, A. y Jeong, J. S. (2016). Using a VGI and GIS-based multicriteria approach for assessing the potential of rural tourism in Extremadura (Spain). *Sustainability*, 8(11), 1144, https://doi.org/10.3390/su8111144.

González, J. (2006). *Desarrollo rural de base territorial: Extremadura (España).* Madrid: Junta de Extremadura. Consejería de Desarrollo Rural, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA).

Guillén, R., Hernández, A. M. y Sánchez, J. M. (2020). Claves para mejorar la valoración en destinos turísticos de Extremadura. Una aportación del Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ). *Investigaciones Geográficas* (España)(74), 139-163, https://doi.org/10.14198/INGEO2020.GPHCSM.

Gurría, J. L. (2007). El sistema urbano en Extremadura y su influencia en el desarrollo rural. *Ciudad y Territorio: Estudios Territoriales* (151), 29.

Iturralde, O. (2017). Análisis espacial multicriterio enfocado a la gestión de proyectos de agua potable en el municipio de Huimanguillo, Tabasco. Kuxulkab', 23(46).

Jeong, J. S., García, L., Hernández, J. y Jaraíz, F. J. (2016). Modelización sostenible del emplazamiento de nuevas segundas residencias en el medio rural. El caso de La Vera (Extremadura), *Estudios Geográficos*, (LXXVII)280, 191-216, https://doi.org/10.3989/estgeogr.201607.

Laffeuillade, L. M., Barragán, F. G., Geraldi, A. M. Y Arias, J. (2020). Modelo de localización óptima de balnearios mediante análisis espacial en la provincia de Buenos Aires. República Argentina. *Cuadernos Geográficos*, 59(2), 330-348, https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.9810.

Lamelas, M. T. (2014). Aplicación de técnicas de análisis multicriterio a la localización óptima de extracciones de arenas y gravas en el entorno de Zaragoza. *Boletín de la Asociación de Geografos Españoles*, 66, 25-48, https://doi.org/10.21138/bage.1778.

Leco, F., Pérez, A. y Mateos, A. B. (2017). Crisis demográfica en la Extremadura rural: valoración a través de los Grupos de Acción Local (2007-2014). *Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada*, 56(1), 76-100.

Luque, A. M. L. (2003). La evaluación del medio para la práctica de actividades turístico-deportivas en la naturaleza. *Cuadernos de Turismo* (12), 131-150.

Marsden, T. y Sonnino, R. (2008). Rural development and the regional state: Denying multifunctional agriculture in the UK. *Journal of Rural Studies*, 24(4), 422-431, https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2008.04.001.

Moyano, P. B. (2018). La implicación de los agentes sociales y económicos en el desarrollo rural: una necesidad insatisfecha. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 17(1380-2018-086), 55-79, https://doi.org/10.7201/earn.2017.02.03.

Navarro, F., Cejudo, E. y Maroto, J. C. (2014). Reflections on participation in rural development. Social distribution or strengthening of power? LEADER and PRODER in southern Spain. *Eure*, 40(121), 75-91.

Nieto, A. y Cárdenas, G. (2015). El Método Leader como política de desarrollo rural en Extremadura en los último 20 años (1991-2013). *Boletin de la Asociacion de Geografos Españoles* (69), 23, https://doi.org/10.21138/bage.1893.

Nieto, A. y Cárdenas, G. (2018). The Rural Development Policy in Extremadura (SW Spain): Spatial Location Analysis of Leader Projects. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(2), 76, https://doi.org/10.3390/ijgi7020076.

Nieto, A., Cárdenas, G. y Costa, L. M. (2019). Principal Component Analysis of the LEADER Approach (2007–2013) in South Western Europe (Extremadura and Alentejo). *Sustainability*, 11(15), 4034, https://doi.org/10.3390/su11154034.

Palma, J. L. (2015). Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Metodologías de Evaluación Multicriterio (EMC) en la búsqueda de escenarios alternativos para el mejoramiento socio-espacial de las áreas urbanas populares de la Ciudad de Comayagua. *Ciencias Espaciales*, 8(2), 452-468, https://doi.org/10.5377/ce.v8i2.2092.

Pinzón, E. (2015). Determinación de zonas aptas para la construcción de colegios distritales en la localidad de Suba, partiendo de métodos de análisis multicriterio y herramientas SIG, Universidad militar Nueva Granada.

Risco, I. y De la Macorra, L. F. (2006). Área transfronteriza Alentejo, Extremadura y Centro: situación socioeconómica y perspectivas. *Revista de Estudios Extremeños*, 62(3), 1145-1166.

Wind, Y. y Saaty, T. L. (1980). Marketing applications of the analytic hierarchy process. *Management science*, 26(7), 641-658.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 461-469

La ciudad bajo la nieve: dinámica de las actividades urbanas durante un evento de nevadas extremas utilizando Google Points of Interest

J. Carpio Pinedo[1], E. Santiago Iglesias[2], J.C. García Palomares[2]

[1] *Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio. ETS de Arquitectura (ETSAM). Avda. Juan de Herrera, 4. 28040, Madrid.*
[2] *Universidad Complutense de Madrid, tGIS – Departamento de Geografía. Facultad de Geografía e Historia. Calle Profesor Aranguren, s/n. 28040, Madrid.*

jose.carpio@upm.es, ensantia@ucm.es, jcgarcia@ucm.es

RESUMEN: El cambio climático está generando eventos extremos en todo el mundo, cada vez más frecuentes, de mayor intensidad y que afectan territorios más diversos, muchos actualmente no preparados para enfrentar estas situaciones. En enero de 2021, gran parte del territorio peninsular vivió una nevada sin precedentes, que en la ciudad de Madrid supuso el cierre de gran parte de las actividades durante días. Los datos geolocalizados procedentes de fuentes big data, como la información de los puntos de interés (POI) de Google Places y sus perfiles de actividad asociados en Google Popular Times (GPT) nos permiten un análisis detallado de interrupción de la actividad con la nevada y de cómo fue la recuperación posterior. Para diferentes tipos de actividades, analizamos el diferente impacto espacio-temporal y la resiliencia o capacidad de recuperarse a lo largo de las semanas siguientes. Lo hacemos aprovechando la oportunidad que ofrece el alto nivel de detalle de esta fuente de datos y la capacidad de análisis de los Sistemas de Información Geográfica.

Palabras-clave: nevadas extremas, actividad urbana, Big data geolocalizado, Google Popular Times (GPT), SIG.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático está transformando la vida en nuestro planeta. Sus efectos incluyen una mayor frecuencia e intensidad de temperaturas extremas, que conducen a situaciones como olas de calor, inundaciones, sequías, huracanes, tormentas de polvo e incendios forestales. A la vez, aunque el calentamiento global está reduciendo la frecuencia general de las precipitaciones, estamos presenciando un aumento en el número y la intensidad de los eventos de precipitaciones intensas. Los datos observados confirman el aumento desde la década de 1950, de manera que por cada grado Celsius de incremento en las temperaturas medias se estima que estos eventos son un 7% más intensos y 50% más frecuentes (Masson-Delmotte et al, 2021). Estos cambios afectan también a la probabilidad de cambios en los patrones de las nevadas, que tienen una gran variabilidad: disminuyendo en algunas regiones y aumentando en otros espacios (Faranda, 2020).

A pesar de que son frecuentes los trabajos sobre el impacto de los eventos meteorológicos extremos (De Sario, 2013), es posible realizar nuevas aportaciones a la investigación para comprender sus efectos en las ciudades. Por ejemplo, pueden realizarse nuevas aportaciones al estudio de la interrupción de las actividades urbanas en caso de inundaciones y fuertes nevadas utilizando nuevas fuentes de datos. En el caso de las nevadas extremas, pueden causar una gran perturbación en las ciudades por varias razones. Primero, porque su impacto puede ser repentino, en apenas unas horas. Segundo, porque la nieve se convierte en un obstáculo físico tanto para los peatones como para el tránsito, afectando eventualmente todo tipo de movimiento dentro de la ciudad. En tercer lugar, porque la nieve puede dañar las torres y líneas eléctricas, provocando averías y apagones eléctricos (Ohba y Sugimoto, 2020). En resumen, las fuertes nevadas pueden interrumpir potencialmente toda actividad en la ciudad.

Algunos trabajos han estimado el impacto disruptivo de nevadas extremas en la actividad humana en las áreas urbanas. Autores como Rooney (1967) o De Freitas (1975) observaron hace tiempo las correlaciones entre las propiedades de las nevadas (profundidad, velocidad y duración de las nevadas, velocidad del viento,

etc.) y el tipo de perturbación causada. Como resultado, la predicción meteorológica se puede utilizar para mejorar la consideración del riesgo, la anticipación y las medidas de mitigación. Sin embargo, la evaluación de la interrupción en estos estudios no tiene detalles a escala intraurbana y se basa en la descripción de anomalías que aparecen en los diarios y registros públicos. Algunos datos pueden considerarse cuantitativos para construir variables continuas para algunas dinámicas urbanas específicas, por ejemplo datos de ingresos de parquímetros (Rooney, 1967).

El objetivo de esta comunicación es cuantificar y analizar espacialmente el nivel de disrupción y resiliencia de una ciudad frente a un evento de fuertes nevadas a escala intraurbana y desagregado por categorías de actividad. Usamos el caso de la ciudad de Madrid y el impacto de la gran nevada de la tormenta Filomena, en enero de 2021. La nevada alcanzó los 60 cm, mató al menos a dos personas y bloqueó todos los transportes y el acceso a instalaciones clave como hospitales. La comunicación ha sido posible gracias a la disponibilidad de datos que describen el nivel de actividad en puntos de interés (POI) como tiendas o bares, procedentes de Google Places y sus perfiles de actividad asociados en Google Popular Times (GPT).

2. LA TORMENTA FILOMENA EN MADRID

La tormenta Filomena llegó el jueves 7 de enero, pero se intensificó a lo largo de los dos días siguientes. La gran nevada se produjo como consecuencia del temporal formado sobre el Océano Atlántico, avanzando desde el suroeste y chocando con el aire frío canalizado desde el Ártico. Esto supuso la mayor nevada registrada en Madrid desde 1971. Mientras que las temperaturas mínimas medias típicas del invierno se sitúan entre 0,2 y 3,7 grados, la nevada de Filomena provocó temperaturas superficiales de entre -13 y -2,5 grados. El anticiclón que siguió a Filomena ayudó a mantener la acumulación de nieve de hasta 53 cm de altura durante diez días (Pérez González et al, 2022).

Los efectos de Filomena deben ser considerados como una disrupción de “primer orden” y “paralizante” en la mayoría de las actividades (De Freitas, 1975): transporte urbano (casi ausencia de vehículos en movimiento y muchos vehículos parados), comercio minorista (muchos establecimientos cerrados), aplazamientos de eventos, educación, tráfico ferroviario y aéreo. Solo las instalaciones de comunicaciones y energía no se vieron significativamente afectadas.

Los medios de comunicación describieron la situación como un "caos inaceptable", incluso una semana después de que comenzara a nevar. La nieve en la ciudad de Madrid no es habitual, por lo que los edificios y los servicios urbanos no están tan preparados para las nevadas, por no hablar de la falta de tecnologías de control y retirada de nieve. Seis días después del inicio de las nevadas cerca del 90% de las carreteras estaban afectadas; 12 días después, la situación seguía siendo problemática en el 43% de las carreteras. Mención especial merece la vegetación: el 11% de la cubierta vegetal invernal se vio afectada, ya que muchos árboles de Madrid pertenecen a climas mediterráneos y no están naturalmente preparados para este tipo de tormentas (Pérez González et al., 2022). Muchos árboles e innumerables ramas cayeron, empeorando el bloqueo de caminos y calles.

Según un estudio basado en big data de teléfonos móviles, los primeros días después de la tormenta, los patrones de movilidad disminuyeron a los niveles bajos experimentados en marzo de 2020 durante las primeras semanas de confinamiento extremo en el hogar debido a la pandemia de Covid-19: una reducción del 65% del total de viajes en el primer lunes después de la tormenta. Este estudio concluyó que tomó dos semanas volver a la normalidad en términos de patrones de movilidad (https://elpais.com/espana/madrid/2021-02-12/asi-congelo-madrid-filomena-hasta-un-80-menos-de-movimientos-y-dos-semanas-para-recuperar-la-normalidad.html?prm=copy_link).

3. DATOS Y MÉTODOS

Los datos para realizar esta comunicación se han obtenido de Google Places mediante un proceso de descarga en Python. El conjunto de datos descargados inicialmente consta de 31.868 puntos de interés (POI) en toda la Comunidad de Madrid, para los que a cada hora se recoge información detallada de los mismos. Los datos almacenados contienen la siguiente información: el nombre y el tipo de POI, dirección, número y valoración de las opiniones, histórico de la ocupación media, el tiempo que emplean los usuarios en el POI y la ocupación actual que tiene el POI en el momento de la descarga, este último dato sólo está disponible para los POI que están retransmitiendo “En directo” desde Google Popular Times (Figura 1). Todos los POI están geolocalizados con las coordenadas de latitud y longitud.



Figura 1. Información Google Places y Google Popular Times. Fuente: Imagen obtenida al buscar un POI en la web de Google.

Para realizar este estudio del total de POIs de la Comunidad de Madrid se ha tomado un subconjunto de datos, formado por los puntos de interés que han estado retransmitiendo en directo para el municipio de Madrid durante la semana de diciembre anterior al inicio de las fiestas navideñas (del 14 al 21 de diciembre de 2020) y el mes casi completo de enero y las dos primeras semanas de febrero (del 4 de enero al 15 de febrero de 2021), cuando se produjo el acontecimiento meteorológico de Filomena y las semanas de recuperación. Este subconjunto de datos resultante tiene un total de 9.045 POIs. Para la realización del análisis, los datos se han agrupado por semanas, es decir, para cada una de las semanas se tiene los POI que han retransmitido en directo, por lo menos un día de esa semana y la ocupación media que han tenido.

Los POI están clasificados en 87 diferentes tipos de actividad por Google. A partir de esa clasificación, se ha realizado una agrupación en un total de 6 categorías según la temática de la actividad que realizan: Restauración (Dining, con un total de 2.225 POIs), Entretenimiento (Entertainment, 100), Atracciones turísticas (Tourist attractions, 328), Servicios o equipamientos (Public facilities, 599), Tiendas-Compras (Shopping, 4.371), Otros (Other, 1.492). La Figura 2 muestra la distribución especial de los 9.045 POI analizados en la comunicación.

El análisis espacial se ha realizado en diferentes niveles, trabajando por un lado con datos agrupa-dos a nivel de unidades administrativas, trabajando en este caso con los distritos urbanos. Por otro se ha realizado un análisis utilizando mapas de densidades Kernel de los POIs activos e interpolaciones (IDW) del nivel de ocupación de los locales. Para ello se ha utilizado el software ArcGIS Pro.

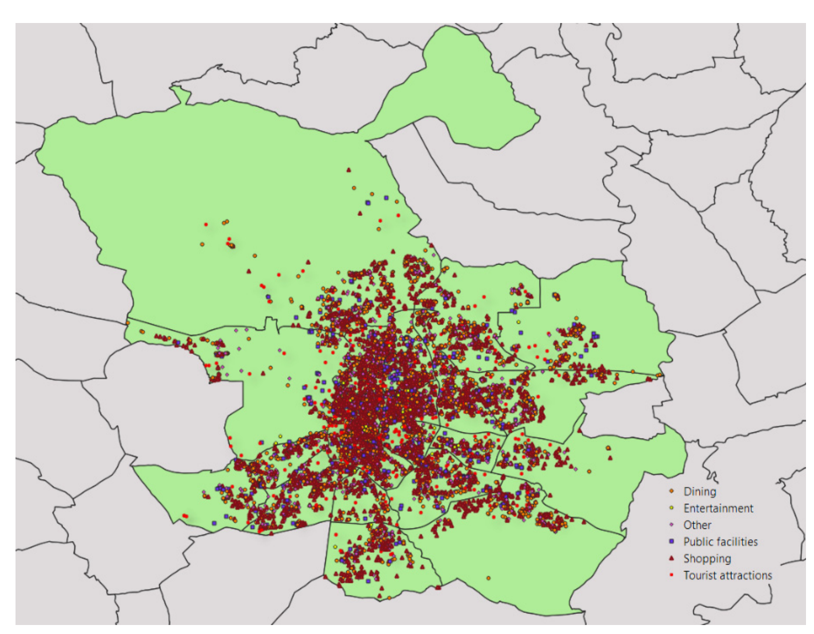


Figura 2. Mapa de los POI clasificados por categoría, dentro del municipio de Madrid. Fuente: Elaboración propia a partir de los Google Places con la herramienta de QGIS.

4. RESULTADOS

4.1. La situación general

La tabla 1 recoge la evolución del número de POIs retransmitiendo en directo y su ocupación media en cada una de las semanas del análisis. Se muestran las diferencias sobre 2ª semana de febrero, tanto en totales como a través de números índices. Se ha decidido tomar como referencia la segunda semana de febrero, ya que la semana previa a las fiestas navideñas está muy alterada debido a las propias actividades navideñas.

Tabla 1. Total de POI que han retransmitido en directo al menos un día de la semana de estudio y su ocupación media

Municipio	*2020 - 2021*					
	Nº de POI retransmitiendo en directo			*Ocupación media*		
Semanas	*Total*	*Diferencia sobre 2º semana de febrero*	*2º semana de febrero = 100*	*Porcentaje*	*Diferencia sobre 2º semana de febrero*	*2º semana de febrero = 100*
12/14-12/20	3795	378	111,06	43,14	2,40	105,88
01/04-01/10	3593	176	105,15	33,30	-7,44	81,73
01/11-01/17	3629	212	106,20	25,20	-15,55	61,85
01/18-01/24	2759	-658	80,74	32,97	-7,77	80,92
01/25-01/31	3313	-104	96,96	37,96	-2,78	93,17
02/01-02/07	3326	-91	97,34	39,43	-1,32	96,77
02/08-02/14	3417	0	100,00	40,75	0,00	100,00

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Places – Google Popular Times.

La Figura 3 muestra la evolución en el número de POI retransmitiendo en directo, así como su ocupación media. Con Filomena se observa primero un descenso brusco de la ocupación media y posteriormente empiezan a bajar el número de POI retransmitiendo en directo. El descenso de la ocupación media empieza la primera semana de enero (04/01/2021 – 10/01/2021), propiciado por la gran nevada que ocurre a finales de esta semana, la semana posterior se registra el punto más bajo de ocupación (11/01/2021 – 17/01/2021) como consecuencia de la nieve amontonada en las calles y potenciado por la ola de frio que arrancó el 10 de enero hasta el 17 de enero.



Figura 3. Total de POI retransmitiendo en vivo y su ocupación media. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Places – Google Popular Times.

A partir de la siguiente semana empieza a subir la ocupación. El comportamiento de los POI retransmitiendo en directo es distinto al de la ocupación, cuando la ocupación empieza a bajar la primera y segunda semana de enero, el número de POI retransmitiendo en directo se mantiene. A pesar de la nevada, los locales

se mantienen en gran medida activos, propiciado por la festividad de reyes para la primera semana de enero y las rebajas para la segunda, pero con unos niveles de ocupación bajos. Sin embargo, pasadas esas dos semanas, la semana (18/01/2021 – 24/01/2021) es cuando se registran las cifras más bajas de POI retransmitiendo en directo. La nevada y la baja ocupación de las semanas anteriores, a lo que se sumó el azote de la 3ª ola de Covid-19 que pegó en la comunidad justo después de las navidades con un aumento de contagios, explica el cierre temporal de muchas actividades.

4.2. Análisis según tipos de actividades

De las 6 categorías en que se han clasificado los POI, se han elegido las dos con mayor porcentaje: Shopping, que con un 48% del total de POIs, agrupa todo tipo de comercios, desde panaderías, tiendas de ropa, muebles, hasta supermercados; y Dining, que supone un 24% del total y contiene tipos como bares, restaurantes y cafeterías.

Como se puede observar en la Figura 4, la categoría de "Shopping" sufre menos el impacto de Filomena. El número de POI retransmitiendo en vivo no sufre mucha variación, con un descenso de un 11.5% en la tercera semana de enero, mientras la segunda semana de enero se ve un ligero aumento coincidiendo con el inicio de las rebajas. Por el contrario, la categoría "Dining" sufre un impacto mucho mayor, de manera que mientras la semana previa a navidades se observa un 28.9% más de POI retransmitiendo en directo, sufre un descenso de un 38,9% durante la tercera semana de enero. Lo mismo ocurre en la ocupación, la categoría de "Shopping" tiene un descenso la segunda semana de enero de un 24.8% mientras en la categoría de "Dining" el descenso supera el 50%. Como se ha visto en el apartado anterior, en ambos casos primero se observa una caída en la ocupación media y posteriormente cae el número de POI retransmitiendo en vivo. Como conclusión de estos resultados se puede sacar ante el impacto de Filomena, los bares y restaurantes se ven mucho más afectados, al final la gente puede prescindir de salir a tomar algo o comer fuera, en cambio, es necesario seguir realizando determinadas compras, como ir al supermercado.

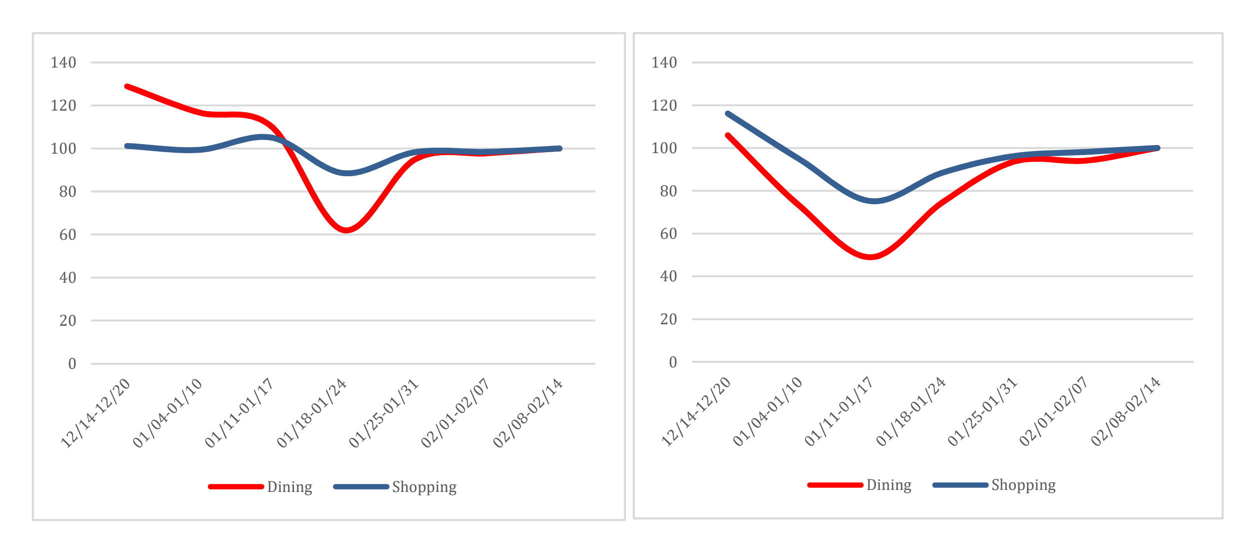


Figura 4. Números índice de los POI según categorías retransmitiendo en vivo (izquierda) y la ocupación media (derecha) tomando como referencia la segunda semana de febrero (2020-2021). Fuente: Elaboración propia a partir de Google Places – Google Popular Times.

4.3. Distribución espacial de la caída de la actividad

Para cada una de las dos categorías vistas anteriormente se han realizado densidades Kernel para ver cómo evoluciona espacialmente el número de POI retransmitiendo en directo, ponderados por su ocupación media (Figuras 5 y 6). Se puede observar que la categoría "Dining" tiene un impacto mucho más fuerte que la categoría "Shopping", sobre todo en la zona centro del municipio de Madrid, donde se ve claramente que la semana previa a las fiestas de navidad el centro engloba los puntos más calientes, y en enero, debido a la nevada y el impacto de la Covid-19, desaparece, hasta finales de mes que empieza a recuperarse la actividad.

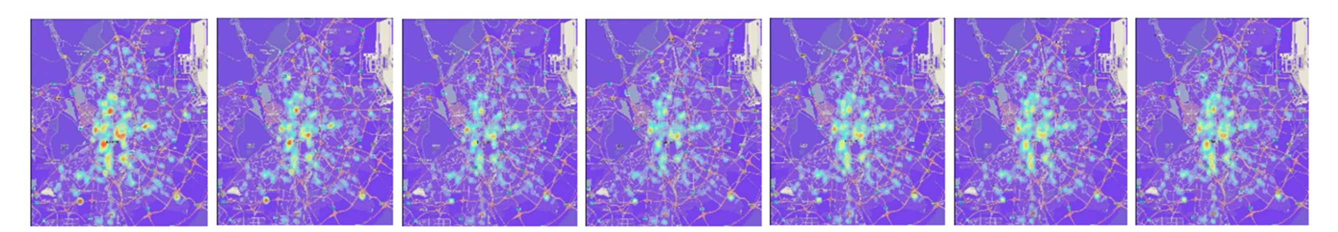


Figura 5. Mapas de densidades Kernel del número de POI retransmitiendo en directo ponderadas por la ocupación media de la categoría "Shopping", para cada una de las semanas en el periodo 2020-2021. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Places – Google Popular Times.

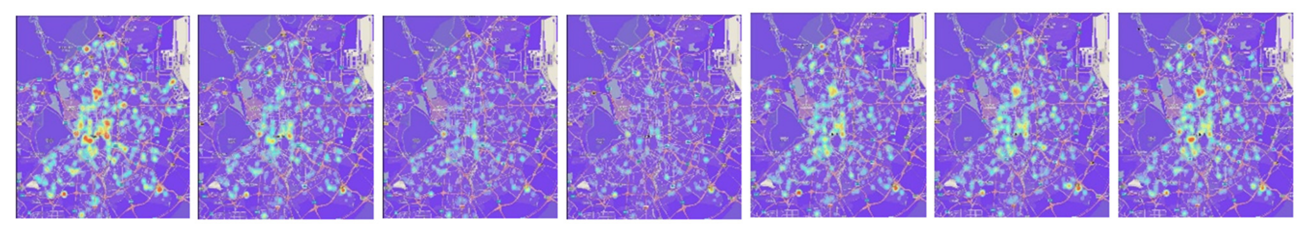


Figura 6. Mapas de densidades Kernel del número de POI retransmitiendo en directo ponderadas por la ocupación media de la categoría "Dining", para cada una de las semanas en el periodo 2020-2021. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Places – Google Popular Times.

Para ver la distribución de las diferencias con respecto a la segunda semana de febrero, se ha realizado un IDW de todos los POI que han estado retransmitiendo en directo ponderados por su ocupación, de ahí se ha calculado la diferencia con respecto a la segunda semana de febrero y se ha cartografiado, los resultados se han obtenido para todas las semanas del estudio en el periodo 2020-2021. En la Figura 7 se puede ver la segunda semana de febrero que es la de mayor impacto en términos de ocupación.



Figura 7. Diferencias porcentuales con respecto a la segunda semana de febrero en el periodo 2020-2021 de la segunda semana de enero. De izquierda a derecha se corresponden con "Totales", "Shopping" y "Dining". Fuente: Elaboración propia a partir de Google Places – Google Popular Times.

Para entender las diferencias espaciales en el impacto de Filomena en la actividad trabajamos con los datos agrupados a nivel de distritos e información sobre la media de edad por distrito, el porcentaje de personas mayores de 65 años y la renta media por hogar en cada distrito. En trabajos posteriores se está evaluando la conveniencia de trabajar con un mayor nivel de detalle (barrio o sección censal). En cualquier caso, como muestran los resultados, se considera que los distritos presentan diferencias suficientes para conocer el papel de las dos variables analizadas.

El papel de estas variables en el impacto de Filomena puede apreciarse si comparamos los datos de algunos distritos, como por ejemplo los de Moratalaz y Villa de Vallecas, localizados al este del municipio de Madrid. Ambos presentan un nivel de renta muy parecido, pero mientras Villa de Vallecas tiene una importante zona residencial de nueva construcción, mayoritariamente de gente joven, Moratalaz es el distrito de Madrid con la población más envejecida. La Figura 8 muestra las diferencias con respecto a la segunda semana de febrero del número de POI retransmitiendo en vivo y su ocupación media. En ambos casos la dinámica es muy parecida, la segunda y tercera semana de enero sufren un descenso de la actividad y luego

empiezan a remontar, pero el impacto es mucho mayor en Moratalaz, donde se ve una diferencia de un 27% en el número de POI retransmitiendo en directo comparado con la caída del 11.4% que sufre Villa de Vallecas. En la ocupación media sucede lo mismo, aunque la diferencia es mucho menor, con una bajada del 8.3% de la ocupación para Moratalaz y un 5.2% para Villa de Vallecas. La recuperación en el distrito de Moratalaz es mucho más pausada, mientras en el distrito de Villa de Vallecas es mucho más rápida.

El diferente impacto de la nevada podemos verlo también considerando dos distritos muy diferentes, como son Chamartín y Puente de Vallecas. Chamartín está situado en la zona norte del municipio, es un espacio menos residencial, con gran cantidad de oficinas y un nivel de renta muy elevado. Al contrario, Puente de Vallecas, en la zona este de Madrid es fundamentalmente residencial y tiene la renta más baja de todo el municipio. Ambos distritos tienen una población por edades parecida, aunque en Puente de Vallecas la edad media es más joven y tiene un porcentaje menor de población de más de 65 años. Analizando las diferencias con respecto a la segunda semana de febrero del número de POI retransmitiendo en vivo y su ocupación media (Figura 9) se puede observar que las diferencias con respecto a la segunda semana de febrero en Puente de Vallecas son mucho menores: la máxima caída en el número de POI retransmitiendo en vivo no llega al 15% y en la ocupación media es del 5.8%, mientras en Chamartín la caída es superior al 30% en el número de POI retransmitiendo en vivo y en la ocupación media del 14.3%.

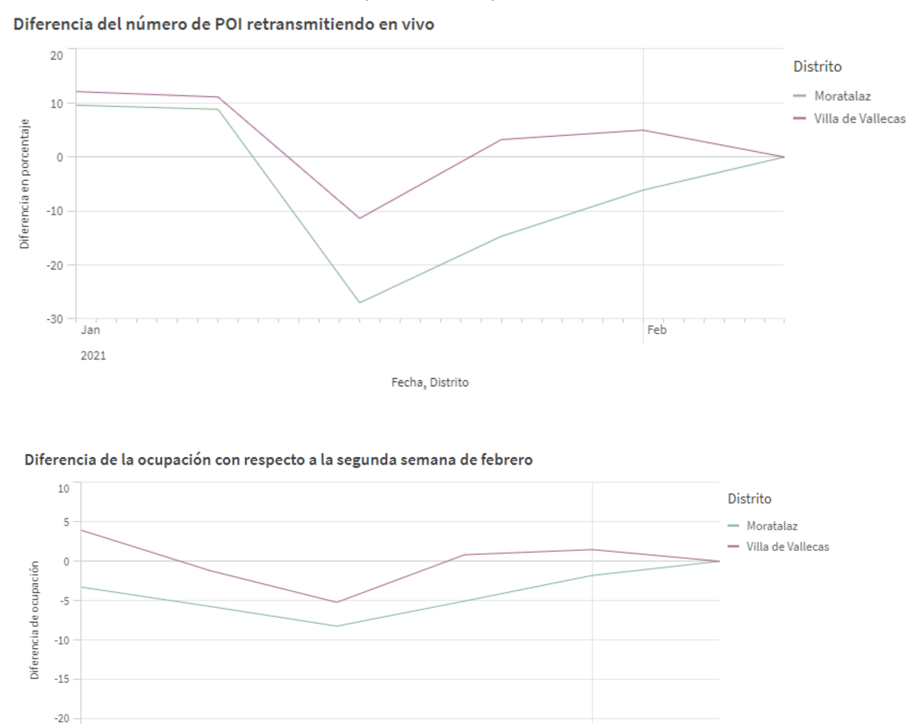


Figura 8. Diferencias en número de POI retransmitiendo en vivo y en la ocupación media con respecto con respecto a la segunda semana de febrero. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Google Popular Times – Geoportal del Ayto. de Madrid, usando QlikSense.

A continuación, se ha procedido a realizar para el conjunto de distritos del municipio un análisis de las correlaciones bivariadas entre las diferencias en cada una de las semanas en el número de POI retransmitiendo en directo y la ocupación media y la media de edad y la renta media por hogar del distrito. Como primer paso, se ha realizado el test Shapiro-Wilks para contrastar la normalidad de cada una de las variables. Los resultados muestran que las variables del número de POI retransmitiendo en vivo para las semanas primera y cuarta no siguen una distribución normal, lo que implica que los resultados para el coeficiente de correlación de Pearson pueden verse afectados por esa distribución no normal. En cualquier caso, se han obtenido también los coeficientes de Spearman y Kendall y muestran tendencias similares.

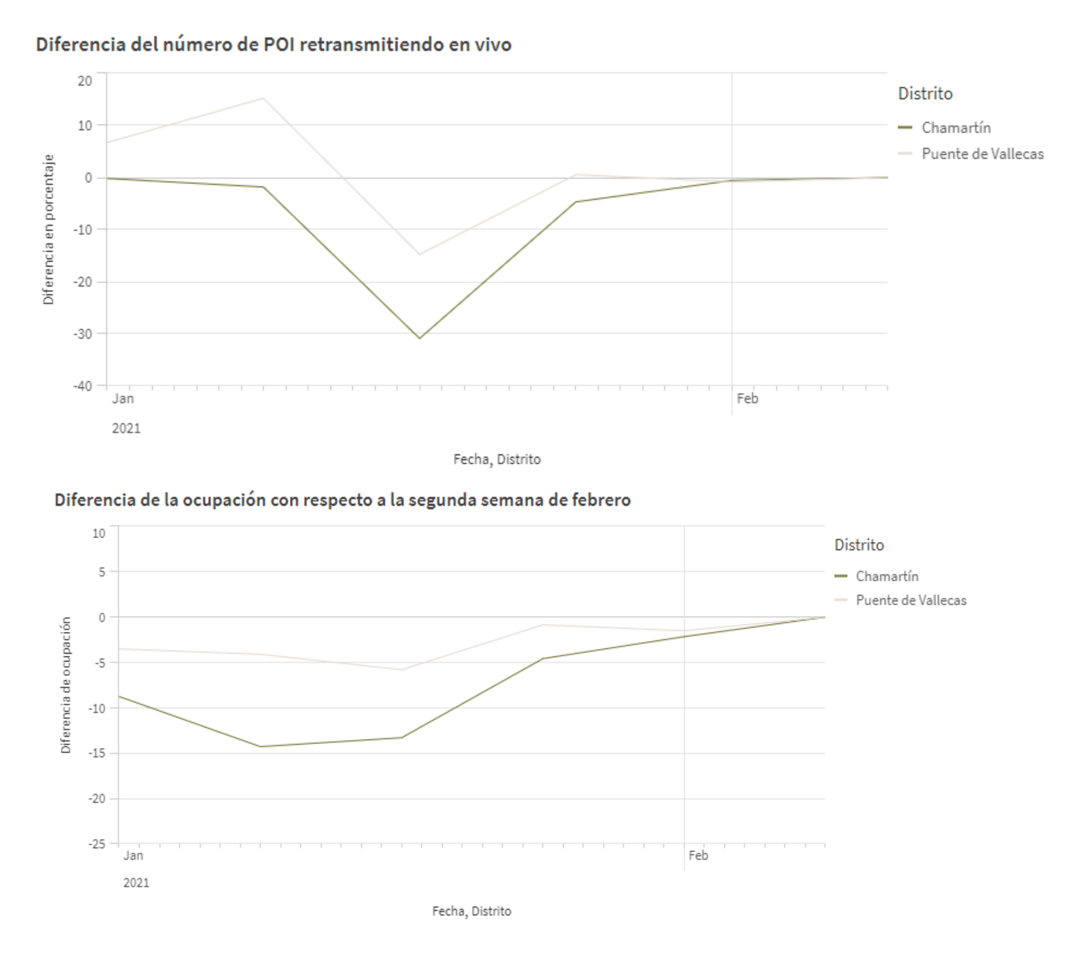


Figura 9. Diferencias en número de POI retransmitiendo en vivo y en la ocupación media con respecto con respecto a la segunda semana de febrero. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Google Popular Times – Geoportal del Ayto. de Madrid, usando QlikSense.

La Tabla 2 muestra los coeficientes de correlación de Pearson según semanas para las relaciones entre la caída en el número de POI activos y las tasas de ocupación media con la edad y la renta media de los distritos. La tercera semana de enero en el caso de la ocupación y la cuarta en el número de POIs activos es cuando se presentan los coeficientes de correlación más altos y significativos, en dichas semanas se presentan las diferencias más significativas con respecto a la semana de referencia, por lo que se podría concluir que a lo largo de Filomena y los días posteriores, los distritos con una población más envejecida y los distritos con rentas más altas tuvieron una menor actividad. En el primer caso, debido a la edad y a la situación de las calles les era más complicado el desplazamiento y en el segundo caso, los distritos con rentas más altas disponen de más recursos para evitar ciertos desplazamientos, así como la posibilidad del teletrabajo.

Tabla 2. Coeficientes de correlación Pearson entre el número de POIs activos y la ocupación media con la edad media y la renta

Semanas	*Número POI*		*Ocupación Media*	
	Edad Media	*Renta Media*	*Edad Media*	*Renta Media*
04/01/2021-10/01/2021	-0,1113	-0,0660	-0,3537	-0,5030*
11/01/2021-17/01/2021	-0,1271	-0,1468	-0,1981	-0,4699*
18/01/2021-24/01/2021	-0,4795*	-0,6377**	-0,4787*	-0,6398**
25/01/2021-31/01/2021	-0,5095*	-0,1758	-0,3668	-0,3153
01/02/2021-07/02/2021	-0,4688*	-0,1118	-0,3053	-0,3704

* p < 0,05; ** p < 0,01

5. CONSIDERACIONES FINALES

Las nevadas extremas causan grandes pérdidas físicas y económicas, inconvenientes y costos, desde la remoción de nieve hasta las operaciones y la reconstrucción de la infraestructura. Algunos trabajos previos han evaluado esos impactos, sin embargo, se ha puesto poca atención a la caída de la actividad a nivel intraurbano. Esto se debe fundamentalmente por la dificultad para acceder a fuentes con el detalle espacio-temporal adecuado para llevar a cabo ese tipo de análisis. En esta comunicación hemos usado datos de Google Places y de la aplicación Google Popular Times, que permite conocer el número de puntos de interés que se encuentran abiertos y el porcentaje de ocupación en los diferentes momentos del día.

Con esos datos hemos podido evaluar la caída de la actividad en la ciudad de Madrid a lo largo de las semanas afectadas por la gran nevada Filomena. Los resultados muestran una caída de la ocupación ya desde el inicio de la nevada, mientras que el impacto en el cierre de los locales se retrasó una semana. El impacto de la nevada se alargó prácticamente durante las tres semanas siguientes, puesto que si bien la tercera semana ya había una cierta recuperación de las tasas de ocupación de los POIs esa recuperación se producía sobre un total de POIs abiertos muy inferior al de una situación normal.

Las nuevas fuentes de datos, como los POIs de Google, permiten analizar con un alto detalle espacial y temporal el impacto de eventos meteorológicos extremos en la actividad urbana. La información derivada de este tipo de trabajos es de gran utilidad tanto para evaluar sus impactos como para establecer actuaciones de prevención y gestión de futuras situaciones similares.

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación es parte de los proyectos de I+D+i DARUMA (PCI2020-120706-2/AEI/10.13039/501100011033/) y NEWGEOMOB (MCIN-AEI/10.13039/501100011033/Project PID2020-116656RB-I00).

6. BIBLIOGRAFÍA

De Freitas, C. R. (1975). Estimation of the disruptive impact of snowfalls in urban areas. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 14(6), 1166-1173.

De Sario, M., Katsouyanni, K. y Michelozzi, P. (2013). Climate change, extreme weather events, air pollution and respiratory health in Europe. European Respiratory Journal, 42(3), 826-843.

Faranda, D. (2020). An attempt to explain recent changes in European snowfall extremes. Weather and Climate Dynamics, 1, 445–458, https://doi.org/10.5194/wcd-1-445-2020

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... y Zhou, B. (2021). *Climate change 2021: the physical science basis*. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf

Ohba, M., y Sugimoto, S. (2020). Impacts of climate change on heavy wet snowfall in Japan. *Climate Dynamics*, 54(5), 3151-3164.

Pérez González, M.E., García Alvarado, J.M. y García Rodríguez, P. (2022). La borrasca Filomena: características y estimación de daños en el arbolado de Madrid mediante imágenes de satélite. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (92). https://doi.org/10.21138/bage.3133

Rooney Jr, J. F. (1967). The urban snow hazard in the United States: An appraisal of disruption. Geograph*ical Review*, 538-559.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 470-477

Destinos ganadores y destinos perdedores en el verano de 2020: Un análisis de flujos turísticos basado en datos de telefonía móvil

A. Condeço-Melhorado[1], J.C. García Palomares[1], G. Romanillos Arroyo[1], J. Gutiérrez Puebla[1]

[1] Departamento de Geografía, Universidad Complutense de Madrid. C. Profesor Arangüren sn, 28940 Madrid.

acondeco@ucm.es , jcgarcia@ucm.es, gustavro@ucm.es, javiergutierrez@ghis.ucm.es

RESUMEN: La pandemia ha cambiado el escenario habitual del turismo en España. La llegada de turistas internacionales se ha visto muy limitada, cobrando un papel fundamental el turismo nacional. En este artículo tratamos de evaluar la distribución de los turistas nacionales en los veranos de 2019 y 2020. Se ha trabajado con viajes realizados por los residentes en el municipio de Madrid al resto de España en los meses de agosto de dichos años. El número de viajes ha sido proporcionado por Kido Dynamics, que los ha calculado a partir de datos de telefonía móvil. Los resultados muestran una caída del 30% en los viajes de agosto de 2020. Aunque hay diferencias, en general las grandes ciudades y las ciudades patrimoniales han sido las principales perdedoras, en especial, aquellas de interior. Frente a ellas, destinos de costa tradicionales y las islas han tenido un impacto menor y una recuperación más rápida. Los resultados muestran que no hay una diferencia clara entre los grupos según nivel de renta, pero aparecen diferencias en determinados destinos, como las islas o la costa cantábrica. El artículo destaca la utilidad de los datos procedentes de la telefonía móvil para el análisis de los flujos turísticos, y en particular los nuevos escenarios como consecuencia de fenómenos disruptivos como la pandemia.

Palabras-clave: turismo nacional, telefonía móvil, pandemia COVID19

1. INTRODUCCIÓN

La pandemia ha alterado radicalmente la intensidad de los viajes turísticos y importancia de los destinos en todas las escalas. Durante este periodo España se ha visto especialmente afectada, con una caída muy brusca del turismo internacional y una reducción en los viajes también de turistas nacionales. Conocer los cambios en el volumen de los flujos y la importancia de los destinos se antoja fundamental para realizar un buen diagnóstico de la nueva situación y promover estrategias de cara a la recuperación de la actividad.

Las limitaciones a la movilidad como consecuencia de la pandemia afectaron a todas las actividades, pero en especial aquellas vinculadas con el contacto social y el ocio. El turismo ha sido uno de los ámbitos afectados con más fuerza. La recuperación está siendo lenta, incluso con el fin de muchas de las limitaciones existen dificultades para alcanzar determinados destinos (fundamentalmente internacionales) y, a la vez, ciertos grupos de población todavía mantienen reparos para realizar algunas actividades o viajes.

En España las restricciones empezaron el 14 de marzo de 2020 con la Declaración del Estado de Alarma, que limitaba la circulación de ciudadanos a actos esenciales. A mediados de junio del 2020 el país entró en una llamada “nueva normalidad”, aunque olas posteriores volvieron a requerir de nuevas limitaciones. Esta situación no permitió recuperar el flujo de turistas internacionales, muy limitado por las restricciones en los diferentes países de origen. De hecho, mientras en el año 2019 visitaron España algo más de 83,6 millones de turistas extranjeros, en 2020 llegaron a España solo 19 millones, lo que supuso una caída del 77%. Sin embargo, durante el verano de 2020 fue posible viajar entre las diferentes Comunidades Autónomas, únicamente con algunas restricciones puntuales debidas a diferentes brotes que iban surgiendo. El levantamiento de muchas de las restricciones ese verano, permitió recuperar una parte importante del turismo nacional, aunque la pandemia trajo cambios en los desplazamientos y en la importancia de los destinos. De un modo general, los incipientes estudios sobre este tema muestran una reducción en el número y la distancia de los viajes durante este verano de 2020 (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021; Pérez-Arnal et al. 2021). Además, algunos estudios demuestran que algunos destinos resisten mejor a los cambios e incluso salen beneficiados, debido a la preferencia por destinos más cercanos y menos masificados (Kido

Dynamics 2020). En el último verano la situación había mejorado significativamente, y la recuperación del turismo nacional es todavía mayor.

Para estudiar los desplazamientos de los turistas y la capacidad de atracción de los destinos se utiliza habitualmente información sobre las pernoctaciones en los establecimientos hoteleros o encuestas a turistas y gestores. A estas fuentes convencionales hoy podemos añadir nuevos datos procedentes del emergente Big Data. Así, las nuevas tecnologías de información y la mayor accesibilidad a dispositivos móviles han dado lugar a la generación masiva de datos provenientes de diversos canales. Gran parte de los nuevos datos poseen referencia espacial, que resulta de gran interés para identificar los patrones y distribuciones espaciales de los flujos turísticos (Calle, 2017; Li et al, 2019). Estas fuentes de datos geolocaliza-dos cubren ámbitos muy distintos, desde búsquedas en Internet, registros GPS, transacciones con tarje-tas bancarias, redes sociales, etc. (Gutiérrez et al., 2016; Gutiérrez et al., 2020). Muchas de ellas tienen que ver también con la incorporación de las TIC a la gestión urbana, en el marco de las *Smart Cities*, o la gestión del propio turismo y el desarrollo de los llamados "destinos turísticos inteligentes". No es de extrañar, por lo tanto, que uno de los campos en los que el Big Data está siendo más utilizado es el estudio del turismo y los flujos turísticos (Chantre-Astaiza et al, 2019).

Una de las fuentes de datos que está suscitando mayor interés es la telefonía móvil. El informe técnico elaborado por Eurostat (2014) sobre la viabilidad del uso de datos de posicionamiento móvil para la obtención de estadísticas sobre turismo es una prueba del potencial de estos datos. De la telefonía móvil se pueden extraer los llamados Call Detail Records (CDR), ligados a la actividad de llamadas y mensajes; los *Data Detail Records* (DDR), sobre acceso a internet; y la información de posicionamiento derivadas de la actualización periódica de dispositivos por la red de antenas. Todos estos registros permiten conocer la actividad de cada usuario y sus trayectorias espacio-temporales (Gutiérrez et al., 2019). Es posible diferenciar entre las horas de permanencia en un mismo lugar (estancias) y los desplazamientos entre zonas de permanencia (viajes), y con esta información conocer tanto los espacios de residencia (siempre de manera agregada y anonimizada) como los espacios visitados.

Este estudio utiliza datos anonimizados de telefonía móvil para analizar la importancia de los desplazamientos internos durante el verano del año 2020, con el objetivo de ver cuáles han sido los destinos ganadores y perdedores en la nueva situación impuesta por la pandemia. Los datos se refieren a los viajes realizados por los habitantes de la ciudad de Madrid hacia otros municipios en España. Para determinar el impacto de la pandemia se comparan los viajes realizados por los habitantes de Madrid en los meses de agosto de 2020 con el mismo mes de 2019. En concreto se analizan qué destinos han salido ganadores, o al menos no perdieron con tanta fuerza, y cuáles vieron reducido con más intensidad en número de turistas recibidos.

A continuación, se muestra las características de los datos usados y la metodología para el análisis realizado. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos, con una cartografía de la distribución de los turistas madrileños durante el verano de 2020 y los cambios en dicha distribución frente a la situación previa a la pandemia. A partir de esa cartografía se ha analizado la situación de los principales destinos, así como la evolución de los grandes tipos de destinos en España. Además, se analiza cómo ha sido la evolución de los destinos según niveles de renta de los turistas madrileños. Estos resultados permiten obtener unas conclusiones generales sobre el impacto que tuvo la pandemia en el turismo interior en España.

2. METODOLOGÍA

Para obtener los flujos de turistas desde la ciudad de Madrid al resto de España la compañía Kido Dynamics ha utilizado datos de telefonía móvil de uno de los principales operadores de telefonía en España. Este operador tiene una cuota de mercado por encima del 20% y que incluye diferentes grupos de población socioeconómica. De esta manera, la muestra con la que se trabaja es representativa de toda la población de la ciudad de Madrid y los resultados se proporcionan expandidos al total de su población, como es habitual en este tipo de estudios (Gutiérrez Puebla, J. et al, 2019).

Los datos con los que trabaja Kido Dynamics son registros anonimizados, que se producen cada vez que el teléfono móvil interactúa con la red, ya sea al realizar una llamada de voz, enviar un mensaje de texto (CDR) o una conexión de datos a Internet (DDR). También se recoge la información de cambios de antenas, cuando el usuario se está desplazando. Hay que señalar que los datos utilizados en este estudio, como en la mayoría de los trabajos con telefonía móvil, no proporcionaron la ubicación exacta de los usuarios, sino la ubicación de la antena a la que estaban conectados durante su interacción con la red. A partir de estos datos, Kido Dynamics ha obtenido el número de viajes salidos desde el municipio de Madrid y sus lugares de destino durante los meses de agosto estudiados. El criterio aplicado para contabilizar los viajes turísticos es el de

aquellos viajes donde se realizan como mínimo dos pernoctaciones en el lugar de destino.

Una vez procesados, los datos se agregan en forma de matrices de origen y destino, similares a las matrices obtenidas tradicionalmente a partir de encuestas de viajes. Como se señalaba, el procedimiento llevado a cabo por la compañía Kido Dynamics parte de la localización de los viajes a partir de antenas de telefonía. Esta referencia espacial de antenas ha sido procesada para referenciarla a unidades administrativas. Como orígenes se ha trabajado secciones censales del municipio de Madrid, utilizando el seccionado censal del Instituto Nacional de Estadística (INE) en 2019, y agrupando las secciones a través de un algoritmo que tiene en cuenta dos aspectos fundamentales: a) un tamaño mínimo necesario en los procesos de reparto de los datos desde las antenas a agrupaciones a secciones censales; b) la optimización de los procesos de cálculo. En total, se trabaja con 179 agrupaciones de secciones del municipio de Madrid como orígenes de los viajes. Para los destinos se ha trabajado con agrupaciones de municipios, tomando como referencia los municipios definidos por el INE en 2019. En los municipios más poblados se trabaja con el municipio, mientras se realizan agrupaciones de municipios en aquellos menos poblados, para garantizar la privacidad de los datos en función de la menor densidad de antenas telefónicas en estos territorios. En este caso, el número total de destinos considerados es de 650. En consecuencia, tanto orígenes como destinos presentan una resolución espacial alta, pudiendo definir muy bien las unidades administrativas en lugares de alta densidad de población. El total de relaciones en las matrices origen y destino con al me-nos un viaje fue de 116.474 relaciones en 2019 y 91.674 en 2020.

A partir de las matrices de viajes se ha realizado un análisis de la distribución de los visitantes según destinos, cartografiando los totales de viajes recibidos en agosto de 2020 y la diferencia en los viajes recibidos con la situación previa a la pandemia. Con estos datos se analiza la evolución de los principales destinos turísticos y se agrega la información según diferentes tipologías de destinos, que permiten conocer el impacto de la pandemia en los viajes entre destinos de costa e interior, destinos rurales y urbanos, ciudades patrimonio, o entre las diferentes regiones costeras (Cantábrico, Mediterráneo, islas, etc.).

Además del análisis a nivel de destinos, las matrices se han enriquecido con información del nivel de renta media por persona en las secciones censales de origen del viaje. Se han utilizado los datos de la Estadística Experimental del INE, asignado el nivel de renta medio de cada zona de origen a los viajes generados en ellas. Las secciones censales se han clasificado en cuatro grupos de renta, calculando los cuartiles de esta variable. Así, los valores de corte obtenidos para crear los grupos de secciones son: rentas bajas (inferiores a 12.146 € netos anuales), renta media-baja (menores de 15.368 €), renta media (menos de 20.406 €) y renta media-alta y alta (superiores a 20.406 €). Con estos datos se ha realizado un análisis de los destinos de los viajes diferenciando según niveles de renta, lo que permite conocer cómo la pandemia ha afectado a los viajes en función del nivel de renta de la población.

3. RESULTADOS

Según los datos recogidos durante el mes de agosto de 2019 los habitantes de Madrid realizaron unos 4.250.000 viajes turísticos en el interior del país (Tabla 1). Esta cifra se redujo a 2.986.000 en agosto de 2020, lo que supuso una caída del 29,7% en el total de viajes realizados. En 2020, la disminución fue muy similar según niveles de renta, sin que puedan verse diferencias significativas en la caída de viajes entre los diferentes grupos según renta. No obstante, el grupo donde más viajes se han recuperado es el de rentas medio-bajas.

La figura 1 muestra la distribución de los visitantes según destinos para agosto de 2020. El tamaño de las esferas muestra el total de visitantes madrileños recibidos por cada zona, mientras los colores presentan la caída porcentual respecto a la situación previa a la pandemia. Los mapas reflejan que los principales destinos turísticos siguen siendo los tradicionales, con las zonas costeras, las islas y también algunas de las zonas rurales de interior y las ciudades patrimoniales a la cabeza. En el año 2020 (Figura 1), en la mayoría de estos destinos se redujo el número de visitantes como consecuencia de la pandemia, pero también aparecen algunos destinos que incrementaron el número de visitantes (colores azules). Son espacios “ganadores”, entre los que destacan municipios rurales de las provincias limítrofes a Madrid y algunas zonas de la costa cantábrica. Entre los grandes perjudicados aparecen fundamentalmente los municipios de la costa catalana, incluida Barcelona, junto a algunos de los grandes destinos costeros y capitales de interior.

Tabla 1. Número de viajes realizados según nivel de renta

Nivel de renta (euros netos)	Agosto 2019	Agosto 2020	Diferencia 2019-2020	
			Total	%
Bajo (< 12.146)	1208501	863926	-344575	-28,5
Medio-Bajo (<15.368)	1099280	748222	-351058	-31,9
Medio-Alto (<20.406)	998945	709275	-289670	-29
Alto (>20.406)	944018	665490	-278528	-29,5
Madrid Capital	4250744	2986913	-1263831	-29,7

Fuente. Elaboración propia a partir de datos de Kido Dynamics y de las Estadísticas experimentales del INE.

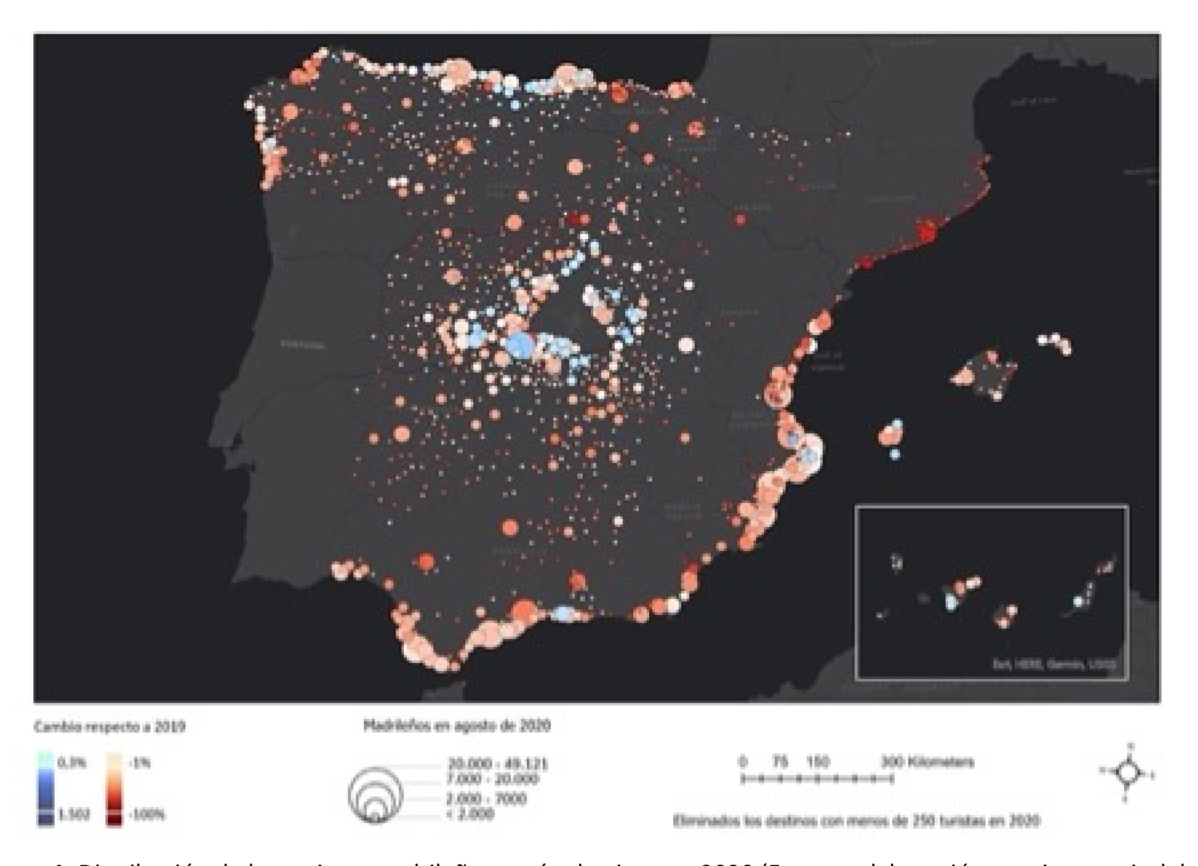


Figura 1. Distribución de los turistas madrileños según destinos en 2020 (Fuente: elaboración propia a partir del número de viajes proporcionados por Kido Dynamics).

La tabla 2 muestra la evolución de los principales destinos. En agosto de 2020 todos tuvieron pérdidas en el número de turistas madrileños recibidos, pero con importantes diferencias. Mientras en algunos destinos las caídas en este primer verano de la pandemia fueron muy grandes, otros consiguieron mantener un volumen importante de turistas, lo que alteró incluso el orden en la importancia de esos destinos. Los principales destinos perdedores ese verano fueron las grandes ciudades. Destacó la caída de Barcelona, por encima del 70%, seguramente también influida por la caída de viajes profesionales. Con esa caída, Barcelona pasó de ser el segundo destino más importante para los habitantes de Madrid en 2019 a estar en la posición número 18 en 2020. Otras ciudades con pérdidas elevadas, por encima del 40%, fueron Sevilla, Bilbao, Granada, Málaga o Cartagena. De ellas, solo Málaga se mantuvo entre los veinte principales destinos en 2020, el resto salió de esta lista. Por el contrario, algunos destinos tuvieron caídas mucho menores. Se trata fundamentalmente de destinos de playa habituales entre los turistas madrileños, como Calp, Conil o Denia, que apenas perdieron alrededor de un 10% de los viajes sobre la situación previa a la pandemia. En la lista de destinos más importantes en 2020, en sustitución de las ciudades mencionadas entraron destinos similares como Oropesa del Mar (pasó del puesto 30 en 2019 al 15), Torremolinos (del 21 al 19) o Chiclana (del 24 al 20) y también alguno de los municipios del cantábrico, como Llanes (del puesto 33 al 16).

Tabla 2. Número de turistas de los 20 destinos más importantes en la situación previa a la pandemia

Nombre	*2019*	*2020*	*Orden 2019*	*Orden 2020*	*2020-2019*	
					Total	*%*
Valencia	64996	49121	1	1	-15875	-24,4
Barcelona	58585	16277	2	18	-42308	-72,2
Benidorm	54395	39655	3	2	-14740	-27,1
Torrevieja	48988	38867	4	3	-10121	-20,7
Alicante/Alacant	46742	38383	5	4	-8359	-17,9
Málaga	45002	25024	6	7	-19978	-44,4
Gandia - Daimús – Benirredrà - Guardamar	42919	28813	7	5	-14106	-32,9
Marbella	30694	23745	8	8	-6949	-22,6
Gijón	29041	21411	9	10	-7630	-26,3
Vera - Garrucha	27611	18125	10	14	-9486	-34,4
Granada	27022	14144	11	24	-12878	-47,7
Santander	26853	20676	12	12	-6177	-23,0
Sevilla - Santiponce	25717	12339	13	37	-13378	-52,0
Dénia - Poblets, els	24791	21386	14	11	-3405	-13,7
Conil de la Frontera	24660	21662	15	9	-2998	-12,2
Coruña, A	23698	14069	16	25	-9629	-40,6
Cartagena - Unión, La	23198	13055	17	31	-10143	-43,7
Sanxenxo	23128	16413	18	17	-6715	-29,0
Bilbao	21809	11113	19	42	-10696	-49,0
Calp	21807	20175	20	13	-1632	-7,5

En general, en el conjunto del país, los destinos de costa han tenido una caída menor que las zonas de interior (Tabla 3). Así, mientras la costa ha recuperado el 86% de los viajes de madrileños recibidos en 2019, el interior no alcanza todavía el 80%. Curiosamente el impacto de la pandemia ha sido mucho menor en los destinos insulares que en los destinos en la península. Así, a pesar de la necesidad de desplazamientos aéreos, las islas tuvieron una caída del 24% en 2020, hasta 6 puntos menos que los destinos en la península. Otros de los destinos “ganadores” en 2020 entre los habitantes de Madrid fueron las zonas rurales, con caídas del 25%, mientras los destinos urbanos perdían casi un 34% de sus turistas madrileños. Entre esos destinos urbanos, las ciudades Patrimonio de la Humanidad, muchas de ellas ciudades de interior, han sido uno de los grandes destinos perdedores con la pandemia. En agosto de 2020 fueron visitadas por algo más de 250 mil madrileños, cuando el verano anterior lo habían hecho más de 400 mil, lo que supuso una caída por encima del 37%. Finalmente aparecen también diferencias entre la costa mediterránea y la cantábrica, con esta última como claro destino ganador durante el verano de 2020.

Aunque no aparecen diferencias en la caída del número de viajes entre niveles de renta, si se observan algunas diferencias cuando desagregamos según tipo de destinos (Figura 3). En los destinos rurales o en la costa mediterránea los habitantes de Madrid con rentas más bajas son más numerosos. Además, en los destinos rurales la caída en 2020 fue menor entre las rentas bajas que entre las rentas altas, mientras en el mediterráneo las caídas fueron similares en ambos grupos. Por el contrario, en los destinos del eje cantábrico predominan los habitantes de Madrid de rentas alta y además estos destinos tuvieron una caída menor entre las rentas altas que en las más bajas. Pero lo que más llama la atención es el comportamiento de las islas. En el verano de 2019 la Islas Canarias recibieron más visitantes de renta baja que de alta, mientras en las Islas Baleares ocurría lo contrario. Sin embargo, en los dos casos la caída fue mucho mayor en el caso de los visitantes de renta baja. Así, la caída de los visitantes de renta baja fue de un 36% en Canarias y del 38% en Baleares, mientras entre las rentas altas fueron del 21 y 13% respectivamente.

Tabla 3. Distribución de turistas madrileños según tipo de destino

Tipo de destino	*2019*	*2020*	*Diferencia 2019-2020*	
			Total	*%*
Interior	2144904	1483636	-661268	-30,8
Costa	2105840	1503277	-602563	-28,6
Península	4055642	2838542	-1217100	-30,0
Islas	195102	148371	-46731	-24,0
Urbanas	2321880	1541452	-780428	-33,6
Zonas rurales	1928864	1445461	-483403	-25,1
Patrimonio de la Humanidad	402114	251228	-150886	-37,5
Cantábrico	532827	413440	-119387	-22,4
Mediterráneo	1377259	942138	-435121	-31,6
Total	4250744	2986913	-1263831	-29,7

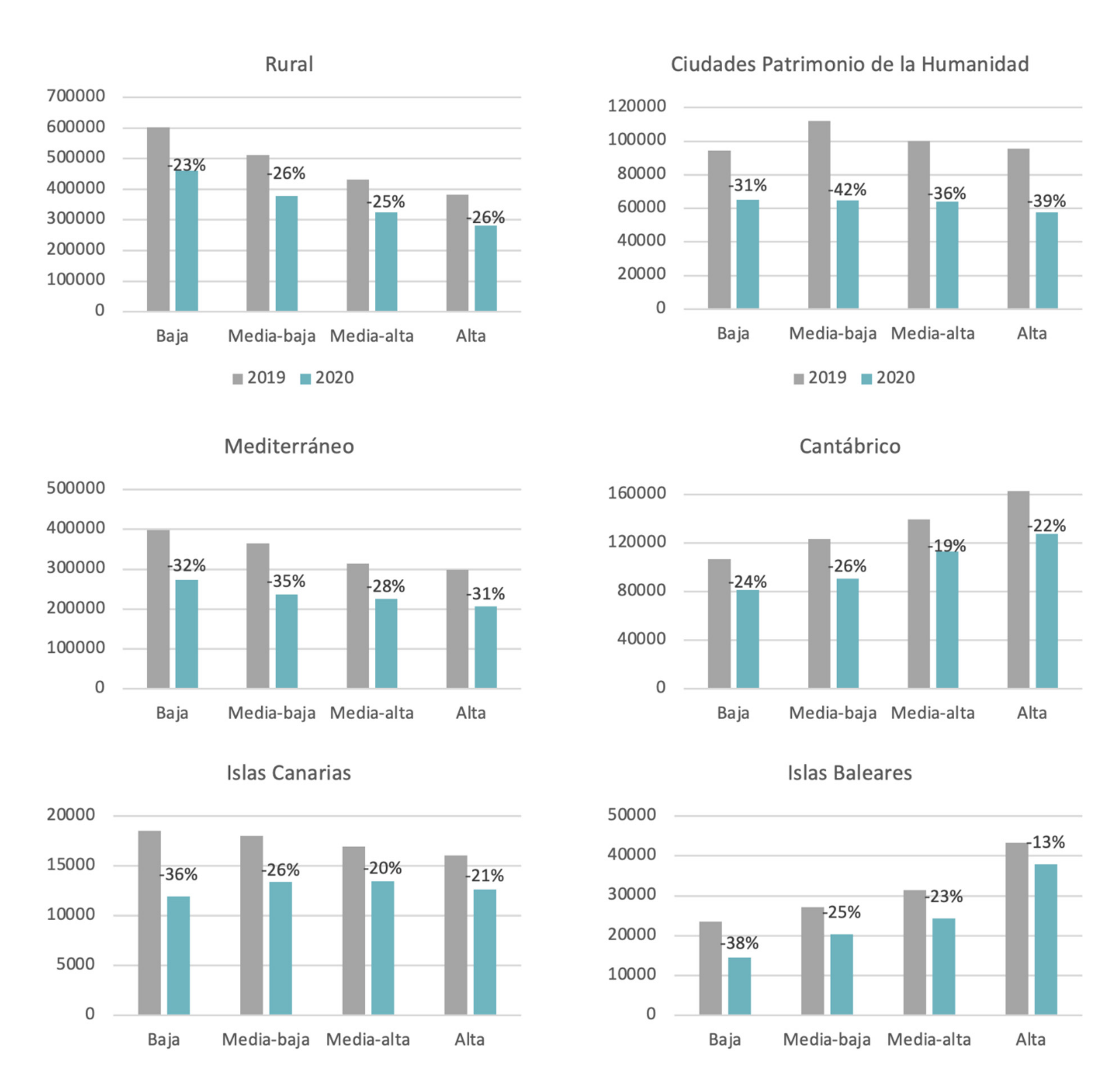


Figura 2. Distribución del total de viajes de madrileños según destinos y su nivel de renta. (Fuente: elaboración propia a partir del número de viajes proporcionados por Kido Dynamics).

4. CONCLUSIONES

Los datos procedentes de la telefonía móvil han mostrado su utilidad en numerosas aplicaciones. En este trabajo se han usado para analizar flujos turísticos, con la atención puesta en los cambios que la pandemia ha supuesto en los viajes de los habitantes de Madrid al resto de España. Una de las grandes ventajas de los datos de telefonía es su alta resolución temporal y espacial. Gracias a ese alto detalle temporal y espacial es posible analizar cambios en la distribución de la población en cualquier periodo, ya sea a lo largo del día o de periodos mayores. Aquí hemos usado los datos de telefonía para conocer los viajes realizados por los habitantes de Madrid que han pernoctado más de dos noches fuera de su lugar de residencia y hemos comparado el mes de agosto previo a la pandemia (2019) y el mismo mes en el primer año de la pandemia (2020). Los resultados permiten obtener conclusiones sobre las consecuencias de la pandemia en el turismo nacional en España. Además, se han enriquecido los datos de telefonía con información del nivel de renta medio del lugar de residencia de la población. Esto es posible mediante la aplicación de herramientas de análisis espacial y superposición de datos georreferenciados. De esta manera es posible analizar la distribución de los flujos turísticos según grupos de población con similar nivel de renta y analizar los cambios en el número de viajes y en los destinos para cada grupo.

El análisis realizado permite obtener un diagnóstico de la nueva situación. Hemos podido medir el impacto de la caída del número de turistas madrileños, y cartografiado los cambios según destinos. La capital es el principal núcleo emisor de turistas nacionales, de manera que su impacto tiene repercusiones importantes en los destinos. Hemos visto como en 2020 la pandemia tuvo un impacto significativo en los viajes, a pesar de la apertura a la movilidad entre regiones y la menor incidencia del virus en aquel momento. Los viajes cayeron con fuerza (un 30%) y también se alteró la distribución habitual de madrileños según destinos. En este primer verano, zonas como la costa cantábrica, los espacios rurales o las islas fue-ron los destinos menos castigados, frente a los destinos urbanos y las ciudades Patrimonio de la Humanidad que fueron las grandes perdedoras. Algunos destinos se vieron especialmente perjudicados, como Barcelona, con pérdidas muy elevadas en las visitas recibidas en 2020.

Conocer el impacto y los cambios en la distribución de los turistas nacionales como consecuencia de la pandemia es fundamental para promover medidas y actuaciones de dinamización turística, en especial en un escenario de fuerte caída del turismo nacional. Desde la Geografía es posible realizar diagnósticos eficientes gracias a la disponibilidad de las nuevas fuentes de información geolocalizada, como la telefonía móvil, y del uso de la cartografía y herramientas de análisis espacial.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio es una versión resumida del siguiente capítulo de libro: Condeço-Melhorado, A.; García-Palomares, J.C.; Romanillos Arroyo, G.; Gutiérrez, J. “Destinos ganadores y perdedores en los veranos de la pandemia: Un análisis basado en datos de telefonía móvil” en. Leyendo el territorio. Homenaje a Miguel Ángel Troitiño”. Los autores agradecen a Kido Dynamics las matrices de viajes proporcionadas para la realización de este trabajo.

Esta publicación es parte de los siguientes proyectos de I+D+i DynMobility (RTI2018-098402-B-I00), financiado por MCIN y FEDER “Una manera de hacer Europa” y de DARUMA, financiado por The European Interest Group CONCERT-Japan.

5. BIBLIOGRAFÍA

Calle, J. V. (2017). Revolución Big Data en el turismo: Análisis de las nuevas fuentes de datos para la crea-ción de conocimiento en los Destinos Patrimonio de la Humanidad de España. *International Journal of Information Systems and Tourism* (IJIST), 2(2), 23-39.

Chantre-Astaiza, A., Fuentes-Moraleda, L., Muñoz, A., & Ramírez, G. (2019). Science Mapping of Tourist Mobility 1980–2019. Technological Advancements in the Collection of the Data for Tourist Traceability. *Sustainability*, 11(17), 4738.

EUROSTAT (2014). *Eurostat Feasibility Study on the Use of Mobile Positioning Data for Tourism Statistics.* Consolidated Report of Eurostat Contract No 30501.2012.001-2012.452, 31p. http://ec.europa.eu/eurostat/web/tourism/methodology/projects-and-studies

Gutiérrez, J., Benítez, C., García-Palomares, J.C., Romanillos, G., Rubinstein da Silva, E., Leaño, J.M., Ribeiro, K., Scholl, L., Moya-Gómez, B. y Condeço-Melhorado, A. (2020). *Cómo aplicar Big Data en la planificación*

del transporte: El uso de datos de GPS en el análisis de la movilidad urbana. Nota técnica nºIDB-TN-1 944. Banco Interamericano de Desarrollo (DOI: 10.18235/0002487).

Gutiérrez, J., Benítez, C., Leaño, J.M., García-Palomares, J.C., Condeço-Melhorado, A., Mojica, C., Scholl, L., Adler, V., Vera, F., Moya-Gómez, B. y Romanillos, G. (2019). *Cómo aplicar big data en la planificación del transporte urbano: El uso de datos de telefonía móvil en el análisis de la movilidad*. Nota técnica nº IDB-TN-1773. Banco Interamericano de Desarrollo (DOI: 10.18235/0002009). Open Access.

Gutiérrez, J., García Palomares, J. C. y Salas Olmedo, M. H. (2016). Big (geo) data en ciencias sociales: retos y oportunidades. *Revista de Estudios Andaluces*, 33 (1), 1-23.

Kido Dynamics (2020). El big data de la telefonía móvil revela destinos ganadores y perdedores. Hosteltur. Disponible en: https://www.hosteltur.com/139735_el-big-data-de-la-telefonia-movil-revela-destinos-ganadores-y-perdedores.html

Li, Y., Yang, L., Shen, H. y Wu, Z. (2019). Modeling intra-destination travel behavior of tourists through spatio-temporal analysis. *Journal of Destination Marketing & Management*, 11, 260-269.

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2021). Estudio piloto de movilidad interprovincial. https://observatoriotransporte.mitma.gob.es/estudio-experimental

Pérez-Arnal, R., Conesa, D., Alvarez-Napagao, S., Suzumura, T., Català, M., Alvarez-Lacalle, E. y Garcia-Gasulla, D. (2021). Comparative analysis of geolocation information through mobile-devices under different Covid-19 mobility restriction patterns in Spain. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(2), 73.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 478-485

Necesidad de integración de la política de vivienda en la planificación territorial de la Comunidad Autónoma del País Vasco para alcanzar un territorio no segregado

N. Dávila Cabanillas[1], I. Aguado Moralejo[1]

[1] Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Facultad de Letras. C. Tomás y valiente, s/n, 01006, Vitoria-Gasteiz.

nagore.davila@ehu.eus, itziar.aguado@ehu.eus

RESUMEN: El Gobierno Vasco ha ido desarrollando una política de vivienda al amparo de la Ley del Suelo y Urbanismo del País Vasco de 2006, la cual ya establecía una política activa en cuestiones relativas a la promoción de la vivienda protegida y social. Por su parte, la Ley de Vivienda de 2015, junto con los Planes Directores de Vivienda abogan por gestionar la vivienda y la utilización del suelo de acuerdo con el interés general, garantizando una adecuada integración en el territorio y previniendo fenómenos de segregación. No obstante, los altos estándares de vivienda protegida pueden estar contribuyendo a generar patrones de segregación residencial, acentuando la polarización socio-espacial al concentrar grupos de población con rentas bajas en áreas concretas de muchos de los municipios vascos. En este contexto, las renovadas Directrices de Ordenación Territorial de la Comunidad Autónoma del País Vasco apuestan por consolidar el modelo territorial inclusivo y equitativo, siendo ineludible que el Plan Territorial Sectorial de Vivienda incorpore la medición de la vulnerabilidad urbana. Mediante una serie de indicadores que son expuestos a través de mapas de coropletas, se ha podido comprobar que los municipios que han mantenido una tendencia activa en los últimos años en cuanto a construcción de viviendas protegidas presentan signos de vulnerabilidad urbana. Por consiguiente, es evidente la necesidad de diseñar una adecuada distribución espacial de los suelos destinados a la promoción de vivienda protegida desde el PTS competente. En futuras investigaciones y con análisis espaciales más complejos y multiescalares, los indicadores desarrollados se integrarán en un índice de vulnerabilidad urbana que mida las distintas dimensiones de la segregación socio-residencial.

Palabras-clave: segregación residencial, política de vivienda, planificación territorial, País Vasco.

1. INTRODUCCIÓN. SEGREGACIÓN Y POLÍTICA DE VIVIENDA

Este estudio se integra en un proyecto de investigación “Segregación socioresidencial, desigualdad social y política de vivienda en el País Vasco” (RESOLUCIÓN de 19 de octubre de 2021, del Director del Instituto Vasco de Administración Pública, BOPV nº 216, viernes 29 de octubre de 2021) que explora el debate sobre la segregación social y la efectividad de las iniciativas puestas en marcha desde la política de vivienda vasca. La globalización, la liberalización económica, el desmantelamiento de los sistemas de bienestar y la reestructuración de los mercados laborales están provocando un incremento de la desigualdad que tiene su reflejo espacial en la segregación residencial de las ciudades (Musterd et al., 2017). Esta desigual distribución espacial de los grupos socioeconómicos se ve impulsada en gran medida por las opciones residenciales de los hogares de mayores ingresos, que tienen la capacidad financiera para elegir el lugar de residencia (Tammaru et al., 2020). Por ello, una política activa en cuestión de vivienda se presenta como un elemento fundamental para dar respuesta a la demanda de los numerosos ciudadanos que no pueden acceder a ella en el mercado libre, al tiempo que incide en la consecución de una mayor calidad de vida y una sociedad más justa e inclusiva.

En diferentes foros se ha destacado el liderazgo ejercido por el Gobierno Vasco en esta materia y se ha convertido en un ejemplo a imitar para otras regiones. En la CAPV se ha ido desarrollando una política de vivienda al amparo de la Ley del Suelo y Urbanismo del País Vasco de 2006, la cual ya establecía una política activa en cuestiones relativas a la promoción de la vivienda protegida y social. Asimismo, la Ley 3/2015, de 18 de junio, de Vivienda establece la regulación del derecho al disfrute de una vivienda digna y

adecuada. Destaca el apartado j) del artículo 2, puesto que recoge la garantía de una adecuada integración en el territorio, previniendo, evitando o penalizando fenómenos de segregación. De este modo, con los Planes Directores como documentos estratégicos y guías de la política de vivienda pública de la CAPV, se persigue garantizar el derecho a una vivienda digna a los colectivos con mayores dificultades en su acceso. De hecho, la primera seña de identidad del actual Plan Director de Vivienda (2021-2023) reside en reforzar la apuesta por la promoción del alquiler protegido. No obstante, al hilo de investigaciones precedentes desarrolladas en temas relativos a la segregación social (Leal Maldonado, 2002; Allen *et a*l., 2004; Cheshire, 2007; Cassiers y Kesteloot, 2012; Antolín y Fernández, 2020) se considera que debe analizarse si dicha política está obteniendo los resultadas deseados en términos de calidad de vida y equidad social, ya que los altos estándares de vivienda protegida pueden estar contribuyendo a generar patrones de segregación residencial. Es decir, dicha política, que pretende establecer una mayor justicia espacial, puede estar causando efectos contrarios a los perseguidos, acentuando la polarización socio-espacial al concentrar grupos de población con rentas bajas en áreas concretas de muchos de los municipios vascos.

2. OBJETIVO. TERRITORIO NO SEGREGADO Y PLANIFICACIÓN TERRITORIAL

La vivienda se considera un elemento clave en la gestión de la segregación espacial (Rodríguez, 2009) y juega un papel muy importante en la estructura del territorio (Vinuesa y Porras, 2017). En consecuencia, para que la política de vivienda sea plenamente eficaz, debe incardinarse en la Ordenación del Territorio. Con este objetivo se diseñó y redactó en el año 2003 el Avance del PTS de Vivienda de la CAPV, que fue revocado posteriormente. Las Directrices de Ordenación Territorial (en adelante, DOT), instrumento contemplado en la Ley de Ordenación del Territorio 4/1990 como marco de referencia general, se aprobaron por primera vez en 1997 y ya establecían, con el fin de orientar las inversiones públicas en materia de vivienda, la necesidad de redactar un Plan Territorial Sectorial (en adelante, PTS) de Suelo para Promoción Pública de Vivienda. El Avance de este PTS no sólo se justificaba como mandato legal del Parlamento vasco o de las DOT, sino como necesidad de disponer de una referencia territorial para la política sectorial en materia de vivienda. En el año 2019, las DOT fueron revisadas con la voluntad de que sirviesen de marco de referencia renovado. En este nuevo documento la política de vivienda no sólo viene recogida por las directrices en materia de cuantificación residencial (artículo 13[1]), sino que, en las bases y principios rectores del nuevo modelo territorial, la política social de vivienda se considera la base de un territorio equilibrado para lograr un territorio inclusivo. Con todo ello, el presente estudio pretende justificar la necesidad de una planificación territorial sectorial en la CAPV en materia de vivienda pública que considere en la propuesta de dimensionamiento aproximado del suelo para la promoción pública de viviendas, además de lo recogido en su artículo 13, el índice de vulnerabilidad segregativa de los municipios.

3. METODOLOGÍA

La metodología, enmarcada en la primera fase del proyecto referenciado anteriormente, comporta la elaboración de una base de datos de indicadores de segregación a escala municipal (homogenizados y depurados previamente). Partiendo de la idea de que la segregación es un concepto multidimensional y que su medición es compleja, comprender y enfocar su análisis implica aplicar una metodología específica para su medición. Se calcularán diversos indicadores con objeto de valorar la vulnerabilidad segregativa: vulnerabilidad socioeconómica, laboral, sociodemográfica y residencial (Blanco et al., 2021). A su vez, la batería de indicadores diseñada por Aguado *et al.* (2022) para explorar la existencia del "efecto barrio" en la ciudad de Bilbao ha servido para elaborar finalmente una base de datos compuesta por 13 indicadores (ver tabla 1). En la dimensión socioeconómica se incluyen cuatro indicadores que miden el PIB, la renta personal, el número de beneficiarios de Renta de Garantía de Ingresos y el número de unidades convivenciales beneficiarias de Ayudas de Emergencia Social. La dimensión laboral dispone de cinco indicadores (tasa de desem-

[1] En el artículo 13 se recogen las Directrices en materia de cuantificación residencial, en el cual destacamos el punto 3, ya que insta al Plan Territorial Sectorial de Vivienda a que tenga en cuenta las directrices sobre cuantificación residencial distinguiendo por municipios el régimen de protección de las viviendas previstas por el planeamiento urbanístico.

pleo, ocupación, nivel de instrucción, especialización sectorial y tasa de afiliación a la Seguridad Social según el grupo de cotización) que permiten reflejar la situación del mercado laboral. La dimensión sociodemográfica incluye dos indicadores que recogen el estatus migratorio y la estructura demográfica por edad (mayores de 65 años). Finalmente, en la dimensión residencial se han seleccionado dos indicadores con los que poder medir la calidad y ocupación de las viviendas.

Tabla 1. Selección de indicadores

Dim.	*Indicador*	*Definición (unidad de medida)*	*Año*	*Fuente*
Socioeconómico	PIB	Producto Interior Bruto (PIB) generado en el municipio por habitante. € / habitante	2019	Padrón municipal, INE; Cuentas Económicas, Eustat.
	Renta	Cociente entre la renta personal total y la población de 18 y más años. € / habitante	2019	Estadística de Renta personal y familiar, Eustat.
	Renta de Garantía de Ingresos	Número beneficiarios de Renta de Garantía de Ingresos, por cada 1.000 hombres. ‰	2019	Padrón municipal, INE; Lanbide-Servicio Vasco de Empleo.
	Ayudas de Emergencia Social	Número de unidades convivenciales beneficiarias de Ayudas de Emergencia Social (AES), por cada 1.000 habitantes. ‰	2019	Dirección de Inclusión Social, Dpto. de Empleo y Asuntos Sociales (a partir de registros administrativos gestionados por los ayuntamientos).
Laboral	Desempleo	Población parada respecto a población activa. %	2020	Padrón municipal, INE; Lanbide-Servicio Vasco de Empleo.
	Ocupación	Población que está trabajando sobre el total de la población de 16 y más años. %	2020	Padrón municipal, INE; Estadística municipal de población activa, EUSTAT.
	Nivel de instrucción	Coeficiente de localización por niveles de instrucción: analfabetos y sin estudios.	2020	Elaboración propia mediante el programa Geo-Segregation Analyzer. Datos: Estadística municipal de educación, EUSTAT.
	Especialización sectorial	Coeficiente de localización por sectores (población ocupada): agricultura, construcción, industria, servicios.	2020	Elaboración propia mediante el programa Geo-Segregation Analyzer. Datos: Cuentas económicas, EUSTAT.
	Grupo de cotización	Tasa de afil.a la S.S. según grupo Cotización: no cualificados. %	2020	Padrón municipal, INE; Dirección General de la Tesorería de la Seguridad Social. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.
Sociodemográfico	Estatus migratorio	Población extranjera respecto a la población total (%): Índice de segregación e Índice de Gini. Coeficiente de localización por nacionalidades.	2020	Población extranjera: Censos de Población y Viviendas, EUSTAT. 2020. Índices elaborados mediante el programa Geo-Segregation Analyzer. Nacionalidades: Estadística municipal de habitantes, EUSTAT. 2021. Elaboración propia mediante el programa Geo-Segregation Analyzer.
	Envejecimiento	Población ≥ 65 años respecto a población total (%)	2020	Padrón municipal, INE.
Residencial	Antigüedad de las viviendas	Número de viviendas con más de 50 años, respecto al total de viviendas. %	2020	Censo de Población y Vivienda y Estadística Municipal de Viviendas, EUSTAT.
	Número de residentes por vivienda	Coeficiente de localización por número de residentes: > 6.	2020	Obtenido mediante el programa Geo-Segregation Analyzer. Datos: Estadística municipal de viviendas, EUSTAT.

El análisis se centrará en aquellos municipios que destacan por una tendencia activa en construcción de Vivienda de Protección Oficial (en adelante, VPO), y por consiguiente, se contrastarán los municipios en los que se estén constatando una mayor oferta de vivienda de protección pública existente con unos mayores niveles de vulnerabilidad segregativa.

Con objeto de realizar el diagnóstico y caracterización de los distintos niveles territoriales analizados, se han utilizado fuentes estadísticas que ofrecen información a escala municipal. Las principales fuentes consultadas han sido UDALMAP y Open Data Euskadi, que funcionan como un sistema integrado de información territorial con base en los municipios de la CAPV, que se alimentan, a su vez, de diferentes bases estadísticas: Estadística Municipal de Habitantes (Eustat), la Estadística Municipal de Educación (Eustat), la Estadística Municipal de Actividad (Eustat), la Estadística de Renta Personal y Familiar (Eustat), los Censos de Población y Vivienda (INE), la Estadística Municipal de Viviendas (Eustat) y Promociones de Vivienda Protegida (Observatorio Vasco de la Vivienda). Como soporte visual, se ha cartografiado la información mediante la utilización del programa ArcGIS (operaciones de análisis espacial) y el software Geo-Segregation Analyzer específico para el cálculo de indicadores de medición de la segregación (Coeficientes de localización, Índice de segregación, etc.). Esta última herramienta aplicada al análisis de segregación espacial se presentó por primera vez en el 2014 en la *International Conference on Regional Science* (Apparicio et al., 2014). Se trata de un software libre que permite el cálculo de más de cuarenta índices de segregación residencial. Este software ha sido previamente utilizado con el objetivo de cuantificar el nivel de segregación en ciudades como Madrid, Barcelona y Sevilla (Palacios y Vidal, 2014), en el municipio de Bilbao (Aguado *et al.*, 2019) o en Lleida (Aguilar, 2015), entre otras. Este análisis cartográfico ha permitido una primera identificación de los municipios más segregados, que serán a los que se les prestará una mayor atención en el proyecto posterior a desarrollar (Figura 1).

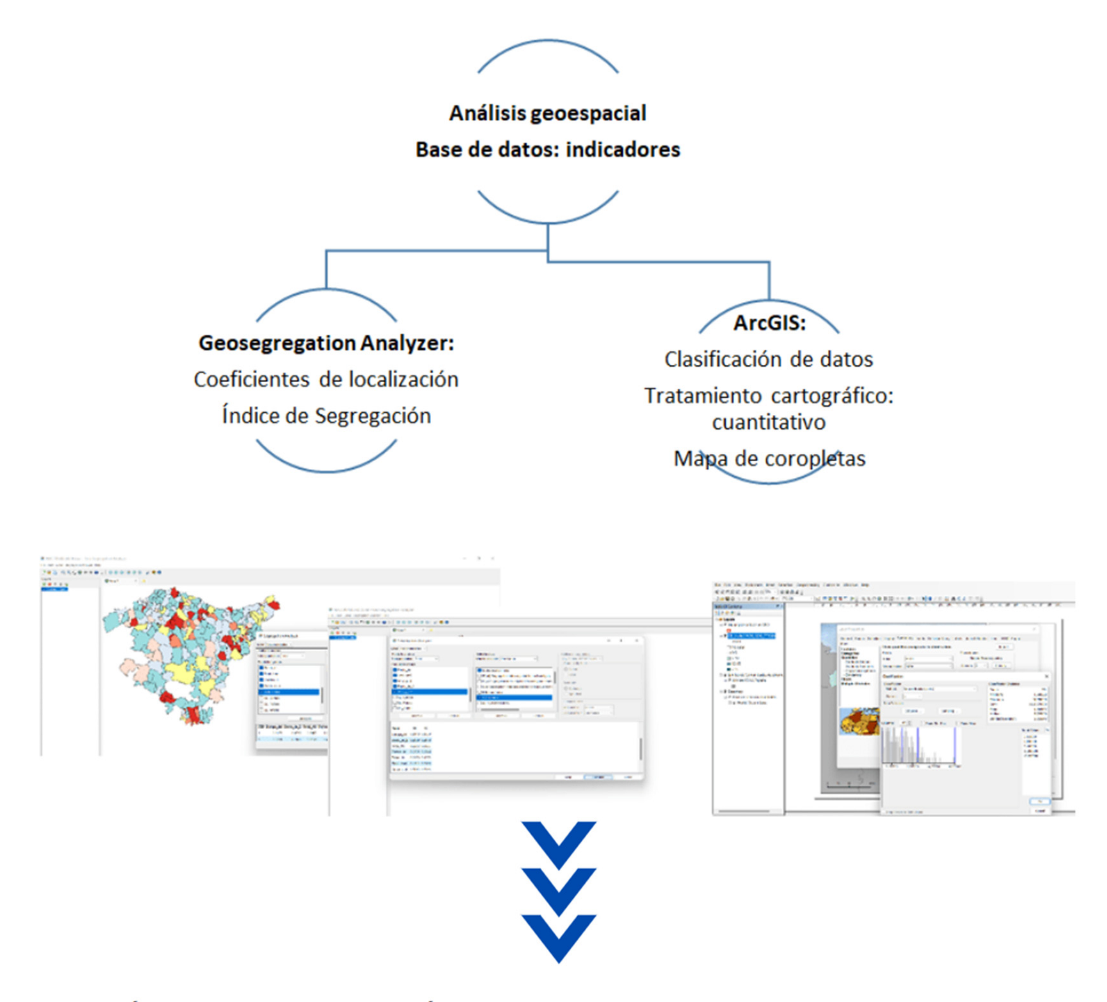


Figura 1. Geoproceso.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS. CORRELACIÓN ENTRE UN MAYOR PORCENTAJE DE VIVIENDA SOCIAL CON UNA MAYOR VULNERABILIDAD URBANA

En primer lugar, se han identificado los municipios que han registrado entre el 2005 y 2020 una media superior en construcción de VPO por miles de habitantes con respecto al total de municipios que han construido VPO en el mismo periodo (perfilados en rojo en la Figura 2). Destacan los municipios de Muskiz, Barakaldo, Arrigorriaga, Leioa, Erandio, Loiu, Derio y Etxebarria en la comarca del Gran Bilbao; Andoain, Lasarte-Oria, Hernani y Astigarraga en la comarca de Donostialdea y Vitoria-Gasteiz, junto con Iruña de Oca, Salvatierra, Valedogovía y Kuartango en la provincia alavesa.

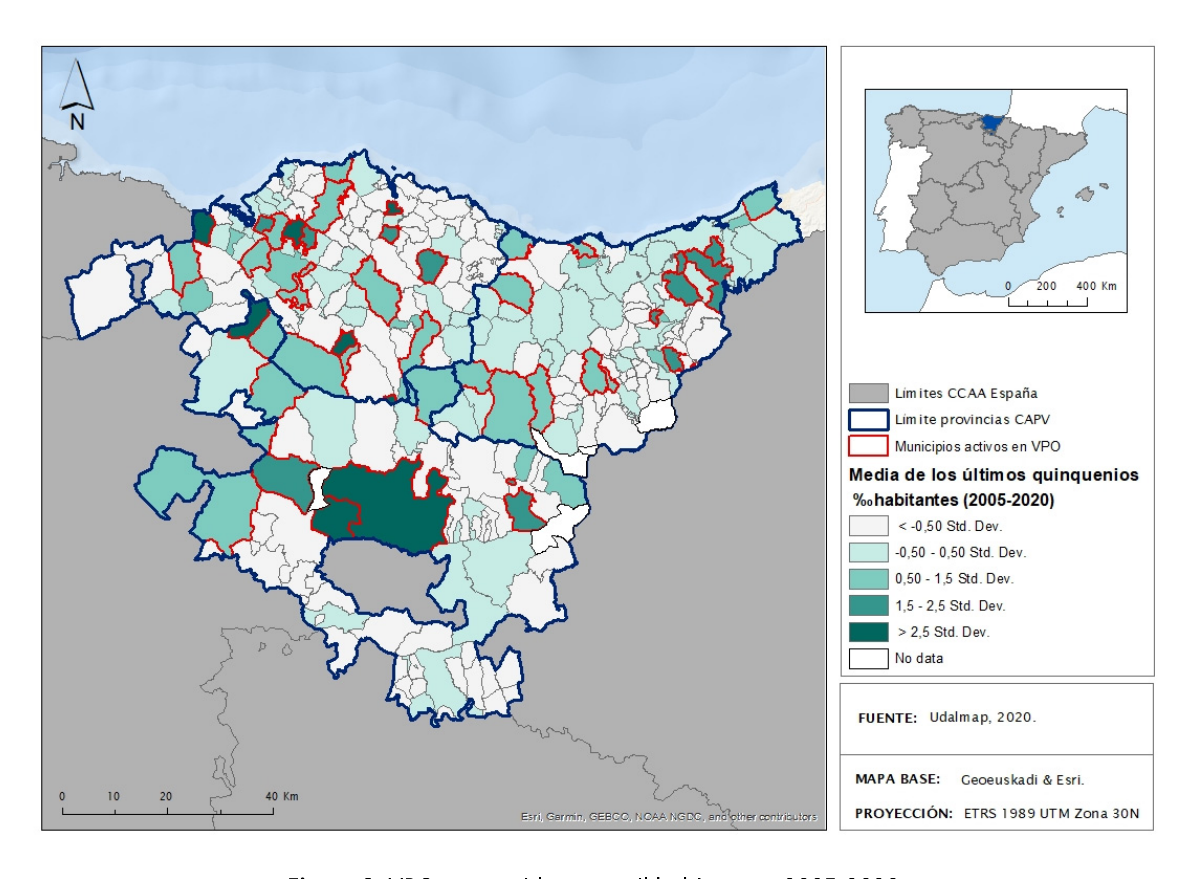


Figura 2. VPO construidas por mil habitantes. 2005-2020.

Según la Ley 2/2006 de suelo y urbanismo del País Vasco, los municipios de más de 3 000 habitantes y los municipios que superen los 2 000 habitantes y cuenten con núcleos continuos de suelo urbano, tienen la obligación de destinar suelo a la construcción de vivienda sometidas a algún régimen de protección pública (art. 82). Deben establecerse además unos estándares mínimos que varían en función del régimen específico de la vivienda (viviendas de protección oficial de régimen general, de régimen especial y de régimen tasado) y del tipo de suelo (suelo urbano no consolidado donde debe superar el 40 % de la edificabilidad urbanística de uso residencial o suelo urbanizable donde superará el 75 % de dicha edificabilidad). Teniendo en cuenta estos estándares, los municipios obligados deberían presentar porcentajes más altos de vivienda protegidas, pero hay que tener en cuenta que, en la actualidad, a pesar del tiempo transcurrido desde su aprobación, tan sólo el 47 % de los municipios han adaptado su planeamiento a la Ley 2/2006 (Departamento de Planificación Territorial, Vivienda y Transportes, 2021). Existen además otros factores que están contribuyendo a la mayor o menor construcción de vivienda y un factor fundamental es la disponibilidad de suelo urbanizable. En esta línea, municipios como Vitoria-Gasteiz, cuyo PGOU de 2001 presentaba un modelo urbano totalmente expansivo, han motivado una amplia construcción de vivienda protegida. En cambio, otros municipios como Bilbao o Donostia/San Sebastián que ya tenían bastante colmatado su espacio urbano, no han podido destinar apenas suelo a vivienda protegida.

Tal y como se ha comentado anteriormente, todos los indicadores seleccionados han tenido un tratamiento cartográfico (Figura 3), tras el cual se han podido identificar aquellos municipios que destacan por la construcción de VPO en los últimos 15 años y presentan signos de vulnerabilidad segregativa.

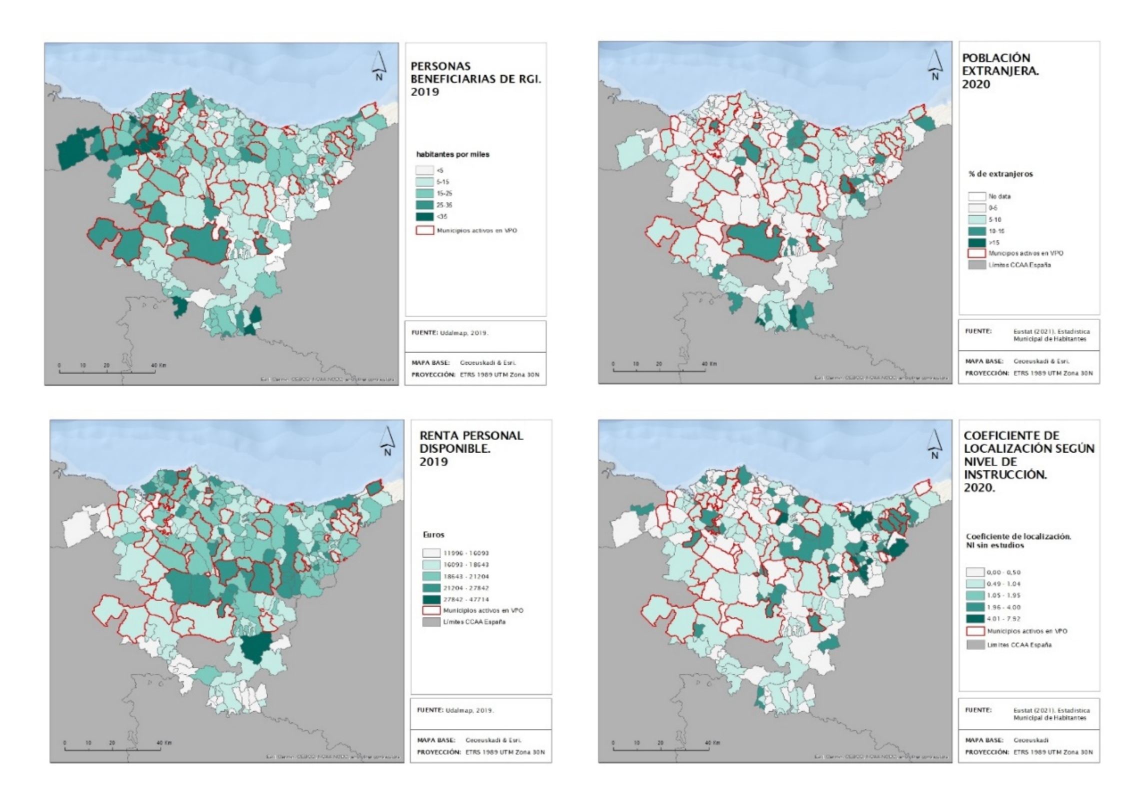


Figura 3. Mosaico de mapas elaborados con algunos de los indicadores seleccionados para analizar la segregación.

Destacan una serie de municipios que despuntan en la mayoría de los indicadores seleccionados. Entre ellos se encuentran los municipios de Vitoria-Gasteiz, Valdegovía, Amorebieta-Etxano, Erandio, Barakaldo, Muskiz y los municipios contiguos a Donostia-San Sebastián, los cuales presentan signos de vulnerabilidad segregativa en todas sus dimensiones al situarse entre los municipios con mayor proporción de población beneficiaria de Renta de Garantía de Ingresos, de Ayudas de Emergencia Social, así como por menores niveles de renta personal disponible, en algunos casos incluso con mayores tasas de paro. Asimismo, llaman la atención los municipios de Lasarte-Oria, Andoain y Astigarraga que presentan altos coeficientes de localización de personas con un nivel de instrucción bajo, en especial Astigarraga, municipio que también registra un coeficiente de localización importante en relación a la población sin estudios. Se produce por tanto en estos municipios una marcada interrelación entre vulnerabilidad económica y vulnerabilidad social. En cuanto a la dimensión sociodemográfica, estos municipios son también los que presentan mayores porcentajes de población extranjera. De hecho, Amorebieta-Etxano, junto con Andoain y Barakaldo, están registrando un mayor aumento en el porcentaje de población extranjera que el resto de los municipios. Por otra parte, cabe señalar nuevamente los municipios contiguos a la capital guipuzcoana (Andoain, Lasarte-Oria, Astigarraga y Urnieta), así como Vitoria-Gasteiz y Amorebieta-Etxano por su bajo porcentaje relativo de viviendas de más de 50 años, lo cual es un claro indicio de que en estos municipios se está aumentado su parque de vivienda en los últimos años, lo que a su vez se traslada al número de vivienda pública construida y queda reflejado en el primer mapa presentado. Es reseñable aquí el caso de la ciudad de Vitoria-Gasteiz, que fue la capital que relativamente más creció en la década de los años 60 del Estado (Arriola, 1985), cuando se produjo su industrialización y que, en principio cuenta con un alto número de viviendas correspondiente a esa década y a las décadas de los 70, y que, a pesar de ello, en términos relativos, un alto porcentaje de sus viviendas cuentan con menos de 50 años. Esto refleja el proceso acelerado de crecimiento de las últimas décadas, en gran parte, basado en la construcción de vivienda protegida, aunque sin alcanzar los estándares fijados por ley, al no tener su planeamiento urbano todavía adaptado.

5. CONCLUSIONES. UN PTS EN MATERIA DE VIVIENDA QUE INCORPORE EL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SEGREGATIVA DE LOS MUNICIPIOS VASCOS

Sin haber llegado a realizar un diseño experimental que pueda concluir cuál habría sido la situación de vulnerabilidad urbana en caso de no implementar políticas públicas de vivienda y sin poder extrapolar claramente una relación de causa-efecto, no se puede afirmar tajantemente que la política de vivienda protegida esté provocando mayores niveles de segregación en dichos municipios. No obstante, teniendo en

cuenta evidencias que correlacionan un mayor porcentaje de vivienda social con una mayor vulnerabilidad urbana, resulta ineludible que el PTS, para su propuesta de distribución territorial, incorpore la medición de la vulnerabilidad urbana de los municipios de la CAPV. Esto contribuirá a consolidar el modelo territorial inclusivo y equitativo propuesto en la Revisión de las Directrices de Ordenación Territorial de la CAPV.

Además, se hace cada vez más necesario la ordenación de los suelos destinados a vivienda protegida a nivel supramunicipal, dado que, por un lado, encontramos muchos municipios en el País Vasco que se encuentran ya colmatados y que apenas disponen de suelo urbanizable que puedan destinar a vivienda protegida. Por otro lado, parece observarse que hay municipios que acumulan la oferta de vivienda protegida y que, debido a ello, se están dando variaciones residenciales entre municipios que llevan a que población con bajos niveles de renta y que cumple los criterios de acceso a vivienda protegida puedan estar trasladando su residencia a estos municipios. Aquí se presenta el reto de cómo incorporar esa planificación de la oferta de vivienda pública a nivel territorial de forma que pueda ser incorporada en el planeamiento municipal, teniendo en cuenta que la competencia de calificación de estos suelos recae en los ayuntamientos. Es aquí donde el papel de liderazgo de Etxebide (Servicio Vasco de Vivienda del Gobierno Vasco) como de otras sociedades públicas como VISESA (Sociedad pública dependiente de Gobierno Vasco para la promoción de vivienda de protección pública y de rehabilitación/renovación urbana) o Alokabide (sociedad pública que gestiona el parque público de viviendas en alquiler) es fundamental. Pero tan fundamental es también el papel ejecutor de las sociedades de carácter municipal relacionadas con la política de vivienda y de los propios Ayuntamientos, que constituyen agentes fundamentales para poder intervenir en el suelo municipal de cara a hacer frente a la demanda de vivienda protegida sin generar concentración de la misma y abogando por unas áreas residenciales mixtas.

En cualquier caso, nuestro trabajo se trata de un estudio preliminar integrado en el proyecto de investigación más amplio que explora el debate sobre la segregación social y la efectividad de las iniciativas puestas en marcha desde la política de vivienda vasca, con el fin de reflexionar sobre si dichas medidas están contribuyendo a disminuir el grado de segregación social de nuestras ciudades o lo está incrementando. El siguiente paso en nuestra investigación se centrará en el cálculo del índice sintético de vulnerabilidad para los municipios de la CAPV, a partir de la normalización de datos (método min-max) y una ponderación mediante un análisis multicriterio basado en el Analytic Hierarchy Process propuesto por Saaty (1980). Este índice servirá como referencia para su inclusión en el cálculo de dimensionamiento de viviendas sociales por parte del PTS correspondiente. Conjuntamente, para comprobar la correlación entre la segregación social y la política de vivienda, dentro del proyecto, se realizará un análisis de autocorrelación espacial junto con un análisis estadístico multivariante, con el que finalmente se realizará una valoración de la incidencia de la política de vivienda a través de indicadores de seguimiento y evaluación de políticas. Esta última fase se realizará mediante un análisis con mayor nivel de desagregación territorial para los municipios de más de 20.000 habitantes, ya el proyecto se enmarca en una escala municipal y barrial, es decir, también tendrá una proyección intraurbana, desarrollando un análisis a escala de barrio para los municipios de mayor población, que permitirá identificar patrones de distribución de los grupos de población en función de distintas variables (renta, nivel de estudios, procedencia, etc.).

6. BIBLIOGRAFÍA

Aguado-Moralejo, I., Echebarria, C. y Barrutia, J. M. (2019). Aplicación de un análisis clúster para el estudio de la segregación social en el municipio de Bilbao. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles,* 81, 1–35. http://dx.doi.org/10.21138/bage.2763

Aguado-Moralejo, I., Echebarria, C. y Barrutia, J.M. (2022). Efecto barrio en Bilbao: evidencia empírica reciente. *Estudios Geográficos*, 83(292), e093. https://doi.org/10.3989/estgeogr.2022101.101

Aguilar, L. (2015). Segregación residencial y población extranjera en Lleida. En J. de la Riva, P. Ibarra, R. Montorio y M. Rodrigues (eds.), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación* pp. 1901–1910. Universidad de Zaragoza-AGE. http://congresoage.unizar.es/eBook/trabajos/201_Aguilar%20Ortiz.pdf

Allen, J., Barlow, J., Leal, J., Maloutas, T. y Padovani, L. (2004). *Housing and welfare in Southern Europe*. Blackwell.

Antolín-Iria, J. E. y Fernández-Sobrado, J. M. (2020). Segregación residencial, políticas de vivienda y rentas familiares en épocas de transformación urbana: Bilbao 1991-2011. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, 52(205), 529–544. https://doi.org/10.37230/CyTET.2020.205.06

Apparicio, P., Martori, J. C. y Fournier, É. (2014). *Geo-Segregation Analyzer: una herramienta para el análisis de la segregación residencial*. En International Conference on Regional Science, 20 y 21 de noviembre. Universidad de Zaragoza. https://old.reunionesdeestudiosregionales.org/Zaragoza2014/htdocs/pdf/p1165.pdf

Arriola, P. (1985). Vitoria-Gasteiz 1950-1980: Política urbana, espacio industrial e industrialización. *Lurralde,* 8, 219-232. http://www.ingeba.org/lurralde/lurranet/lur08/08arrio/arrio08.htm

Blanco i Fillola, I., Cruz González, E. y Gomà Carmona, R. (2021). Densidad institucional, organización ciudadana y vulnerabilidad urbana. En O. Nel·lo i Colom (coord.), *Efecto barrio: segregación residencial, desigualdad social y políticas urbanas en las grandes ciudades ibéricas* pp. 359-385. Editorial Tirant Humanidades.

Cassiers, T. y Kesteloot, C. (2012). Socio-spatial Inequalities and Social Cohesion in European Cities. *Urban Studies,* 9, 1909–1924. https://doi.org/10.1177/0042098012444888

Cheshire, P. (2007). *Segregated neighbourhoods and mix communities. A critical analysis.* Joseph Rowntree Foundation.

Departamento de Planificación Territorial, Vivienda y Transportes (2021). *Inventario del planeamiento.* Gobierno Vasco. https://www.ingurumena.ejgv.euskadi.eus/r49-aa90a/es/aa90aInbentarioaWar/visor/iniciarVisorMapaCAPV?locale=es

Gobierno Vasco (1997). *Directrices de Ordenación Territorial de la CAPV*. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente. Servicio de Publicaciones. https://www.euskadi.eus/web01-a2lurral/es/contenidos/informacion/dot_1997/es_def/index.shtml

Gobierno Vasco (2019). *Directrices de Ordenación Territorial de la CAPV*. Departamento de Planificación Territorial, Vivienda y Transportes. https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/dots_nuevo/es_def/adjuntos/DOT-LAG-2020/DOT_Doc-completo.pdf

Gobierno Vasco (2021). *Plan Director de Vivienda (2021-2023)*. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda. https://www.etxebide.euskadi.eus/contenidos/documentacion/plan_director_2021_2023/es_def/adjuntos/PDV_2021_2023_es.pdf

Leal Maldonado, J. (2002). Segregación social y mercados de vivienda en las grandes ciudades. *RES. Revista Española de Sociología*, 2, 59-75. https://recyt.fecyt.es/index.php/res/article/view/64866

Ley 2/2006, de 30 de junio de Suelo y Urbanismo (BOPV n.º 138, de 20 de julio).

Ley 3/2015, de 18 de junio, de Vivienda (BOPV n.º 119, 26 de junio).

Musterd, S., Marcińczak, S., Van Ham, M. y Tammaru, T. (2017). Socioeconomic segregation in European capital cities. Increasing separation between poor and rich, *Urban Geography,* (7), 1062-1083. https://doi.org/10.1080/02723638.2016.1228371

Palacios García. J., & Vidal Domínguez, M. J. (2014). La distribución intraurbana de los inmigrantes en las ciudades españolas: un análisis de casos con SIG y técnicas cuantitativas. *Cuadernos Geográficos*, *53*(1), 98-121. https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/1335

Rodríguez Alonso, R. (2009). La política de vivienda en España en el contexto europeo. Deudas y retos. *Boletín CF+S*, 47/48. http://habitat.aq.upm.es/boletin/n47/arrod_5.html

Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Pocess*. McGraw-Hil.

Tammaru, T., Marcin´ Czak, S., Aunap, R., van Ham, M., & Janssen, H. (2020). Relationship between income inequality and residential segregation of socioeconomic groups. *Regional Studies*, (4), 450-461. https://doi.org/10.1080/00343404.2018.1540035

Vinuesa-Angulo, J., & Porras-Alfaro, D. (2017). La dimensión territorial de la crisis de la vivienda y el despilfarro inmobiliario residencial. *Cuadernos de Relaciones Laborales*, (1), 101-126. https://doi.org/10.5209/CRLA.54985



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 486-494

Movilidad urbana y segregación social: Un análisis a partir de datos de telefonía móvil

J. Gutiérrez Puebla[1], B. Moya-Gómez[1], M. Stepniak[1], E. Frías[2], J.C. García Palomares[1]

[1] Universidad Complutense de Madrid, tGIS – Departamento de Geografía. Facultad de Geografía e Historia. Calle Profesor Aranguren, s/n. 28040, Madrid.

[2] Telefónica Research

javiergutierrez@ghis.ucm.es, bmoyagomez@ucm.es, marcinst@ucm.es, friasmartinezenrique@gmail.com, jcgarcia@ucm.es

RESUMEN: La segregación social es un tema de gran tradición en los estudios urbanos. Por lo general, los estudios de segregación social se centran en su dimensión residencial, aprovechando los registros oficiales (por ejemplo, datos censales), que reflejan la distribución de la población durante la noche. Sin embargo, la población es muy móvil y que su distribución espacial cambia dramáticamente entre la noche y el día. En este estudio utilizamos datos de telefonía móvil para analizar los cambios en la segregación social entre la noche y el día, utilizando como área de estudio la ciudad de Medellín (Colombia). Se utilizan varios indicadores de segregación social de forma complementaria y se calculan indicadores de movilidad que contribuyen a explicar los cambios en la segregación espacial entre la noche y el día. La principal conclusión es que los movimientos diarios de población entre barrios reducen la concentración de cada grupo dentro de cada barrio y aumentan el grado de mezcla social (exposición) en los entornos locales.

Palabras-clave: segregación social, datos de telefonía móvil, estadística espacial, Medellín (Colombia).

1. INTRODUCCION

La segregación social es un tema de larga tradición en los estudios urbanos. La mayor parte de las investigaciones sobre este tema se centran en la segregación residencial. Ello se debe a que la principal fuente utilizada (el censo) ofrece datos sobre las características de la población según su lugar de residencia. Sin embargo, la segregación no es sólo resultado de las condiciones del barrio de origen, sino también de la movilidad diaria desde y hacia otros barrios (Heringa et al., 2014; Krivo et al., 2013; Kwan, 2013; Östh et al., 2018; Wong y Shaw, 2011). Partiendo de esta literatura previa, en esta comunicación se pretende analizar los patrones de segregación social de la población en el día y en la noche cruzando los registros de telefonía móvil de los usuarios con datos sobre los estratos sociales de los barrios que habitan. Para ello, en primer lugar, se utilizan de forma complementaria indicadores de distintas dimensiones de segregación residencial (concentración, agrupamiento -*clustering*- y exposición) calculándolos tanto en la noche como en el día, para adoptar un enfoque espacio-temporal y multidimensional de la segregación. En segundo lugar, se propone el cálculo del Índice de Shannon no para captar la exposición (mezcla social) dentro de cada barrio, sino en el entorno local de cada barrio (lo que denominamos Índice de Shannon con *Distance-decay*), para reflejar el potencial de contactos sociales entre grupos diferentes cuando la población hace "vida de barrio", superando las "fronteras administrativas" entre barrios. En tercer lugar, y dado que la segregación es un fenómeno dinámico, se proponen indicadores basados en la movilidad de la población para tener en cuenta en qué medida la población de cada barrio aprovecha las oportunidades que les ofrece la ciudad en su conjunto, más allá del entorno local, mitigando sus condiciones de segregación residencial.

2. AREA DE ESTUDIO, FUENTES Y PRE-PROCESO DE LOS DATOS

Medellín es la segunda ciudad más poblada de Colombia, con alrededor de 2.5 millones de habitantes. Se extiende a lo largo de un valle que discurre en dirección norte-sur (Figura 1a). En el fondo del valle se

alinean las principales infraestructuras de transporte y se disponen las principales áreas de actividad económica. Las áreas residenciales más desfavorecidas se localizan en las zonas más elevadas, junto al límite del término municipal, especialmente en la mitad norte del municipio (Figura 1b). En el centro predominan los barrios de estratos sociales medios y en el sureste se concentra la población de mayor nivel de ingresos.

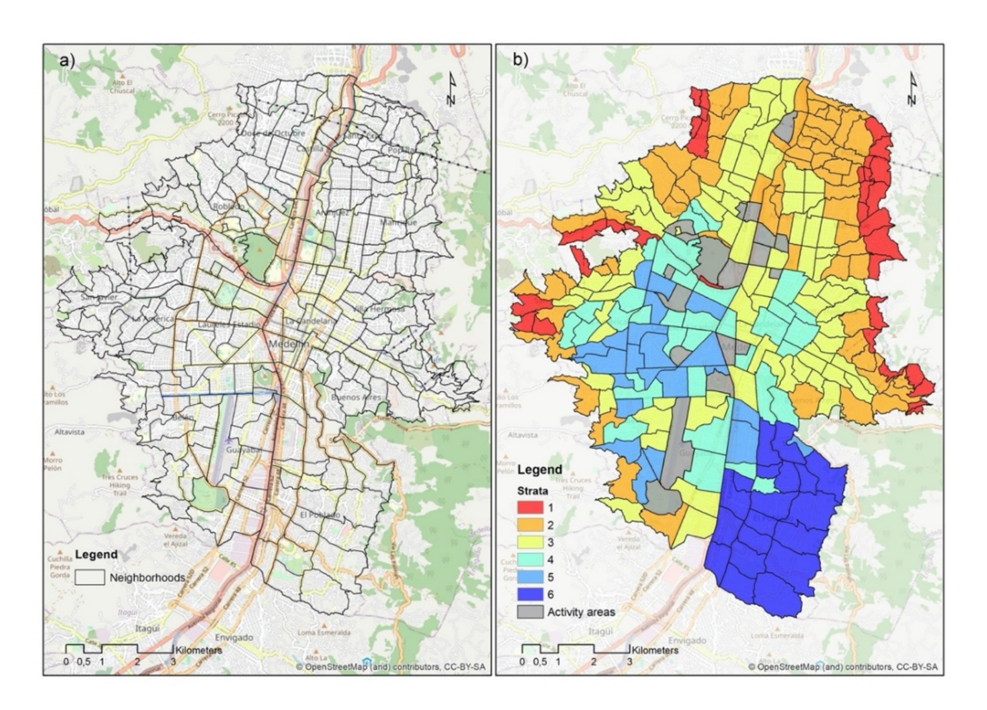


Figura 1. Mapa de referencia (a) y estrato social predominante en cada barrio desde el 1 (menores ingresos) hasta el 6 (mayores ingresos) (b). Fuente: Ayuntamiento de Medellín.

Los datos de teléfonos móviles utilizados son registros de llamadas anónimas proporcionados por uno de los principales operadores de redes móviles en Colombia, con una participación de mercado de alrededor del 25%. La base de datos incluye todas las llamadas salientes de los teléfonos móviles de la operadora durante el periodo de diciembre 2013 a mayo 2014. Cada registro incluye un identificador único de usuario anonimizado, el identificador de la torre de telefonía que transmite la llamada y la fecha de la llamada (minuto, hora, día, mes, año). Así mismo se dispone de otro fichero con la localización de las torres de telefonía (identificador de la torre, latitud, longitud). A cada torre de telefonía se le estimó un área de influencia mediante el cálculo de polígonos de Voronoi en un Sistema de Información Geográfica.

Las primeras tareas de pre-proceso de datos consistieron en la limpieza (eliminando registros inconsistentes) y filtrado (usuarios con alguna llamada en Medellín). Posteriormente, para determinar el área de influencia de la torre de telefonía donde residía cada usuario, se analizó su comportamiento en horario nocturno (de 18 a 6 horas), eligiendo como polígono Voronoi de residencia aquel donde el usuario había registrado el mayor número (moda) de semanas con actividad, con un mínimo de 5 semanas para eliminar polígonos de pernoctación esporádica. El mismo procedimiento se realizó para determinar el polígono más verosímil de trabajo/estudio, entre las 9 y las 12 horas, y desde las 14 hasta las 16. Así mismo, en base a los datos de presencia en la noche y en el día se construyó una matriz de viajes casa/trabajo-estudio para aquellos con residencia y trabajo/estudio en la ciudad de Medellín. Con este proceso, se obtuvo una base de datos con alrededor de 73.000 usuarios internos en Medellín, una muestra lo suficientemente grande como para representar al conjunto de la población de la ciudad. Posteriormente se trasladó la información de los polígonos de Voronoi a una capa de barrios de la ciudad utilizando el método de ponderación *areal* (ver Chakraborty y Armstrong, 1997). El último paso consistió en utilizar factores de expansión para que los datos de presencia de los usuarios y sus viajes fueran representativos del conjunto de la población de la ciudad. Adicionalmente se ha dispuesto de varias capas de cartografía digital con información relativa a la población de cada barrio y su clasificación según estratos sociales provistas por la Alcaldía de Medellín.

La Figura 2 muestra la distribución de la población según barrios en horario nocturno (domicilio) y laboral (trabajo/estudio). Durante la noche (Figura 2a) la población se concentra en barrios periféricos, sobre todo en el norte del municipio, mientras que las áreas centrales están vacías o casi vacías. En cambio, durante

el día (Figura 2b) la población abandona los barrios periféricos y se concentra en las áreas centrales del fondo del valle, sobre todo en el centro y en el sur de la ciudad. El mapa de diferencias entre el día y la noche (Figura 2c) permite identificar las áreas generadoras y atractoras netas de viajes (áreas residenciales y áreas de actividad, respectivamente), las primeras localizadas en la periferia del municipio y las segundas en el centro y el sur.



Figura 2. Población durante la noche (a), durante el día (b) y cambios entre la noche y el día (c). El mapa de cambios permite conocer las áreas generadoras y áreas atractoras de viajes (valores negativos y positivos, respectivamente). Fuente: Elaboración propia.

3. MÉTODOS PARA EL ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN SOCIO-ESPACIAL

Para analizar la segregación de la población de Medellín se utiliza un conjunto de indicadores habituales en la literatura de segregación residencial. El análisis se realiza en un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10.8).

3.1. Concentración

En primer lugar, se calcula la concentración espacial de la población según estratos de ingresos en el día y en la noche. La concentración se mide mediante el coeficiente de localización, una medida muy utilizada en estudios de segregación residencial (ver, por ejemplo, Bauder y Sharpe, 2002). Se calcula según:

$$LQ_{si} = \frac{x_{si}}{X_i} / \frac{Y_s}{Y}$$

Donde:

LQ_{si} es el coeficiente de localización del estrato social *s* en el barrio *i*,

x_{si} es el número de residentes del estrato s que viven en el barrio *i*,

X_i es el total de residentes en el barrio *i*,

Y_s es el total de personas del estrato *s* en la ciudad,

Y es el total de residentes en la ciudad.

Esta medida compara la proporción de población de un estrato en un barrio con la proporción de población de ese estrato en el conjunto de la ciudad. Valores superiores a 1 indican que ese estrato está sobrerrepresentado en ese barrio y valores inferiores a 1 que está infrarrepresentado. Para obtener una medida global del grado de concentración espacial de cada estrato se calcula el coeficiente de variación. Un valor alto indica un alto grado de concentración de ese estrato en el espacio (predominio de valores muy altos en unos barrios y muy bajos en otros, muy alejados de la media). En cambio, un bajo valor en el coeficiente de variación indica que los valores de concentración de ese estrato en los distintos barrios están bastante próximos a la media y que por lo tanto ese estrato está poco segregado espacialmente.

3.2. Agrupamiento (*Clustering*)

El indicador de concentración analiza lo que sucede en el interior de cada barrio, ignorando si valores altos y bajos de concentración de cada estrato tienden a agruparse a no en el espacio. Esto último puede ser medido mediante el Índice de Moran Global, que evalúa la autocorrelación espacial: si el patrón espacial es agrupado, disperso o aleatorio. Posteriormente se utilizó el Índice de Anselin Local Moran's (estadístico LISA) para identificar las tendencias locales. LISA identifica concentraciones espaciales de valores altos, concentraciones espaciales de valores bajos y valores espaciales atípicos (Anselin, 2010). Los dos indicadores anteriores se realizaron para cada estrato social y considerando la interacción espacial entre observaciones dentro de un radio de 1 Km, es decir, unos 15 min andando, con un peso inversamente proporcional a la distancia. Este límite de distancia intenta reproducir el entorno local de cada barrio, es decir, el espacio en el que la población hace "vida de barrio".

3.3. Exposición

La exposición hace referencia a la probabilidad de contacto potencial entre individuos de estratos diferentes. Para conocer el grado de diversidad en cada barrio, en horario nocturno y diurno, se utiliza el índice de Shannon (Shannon, 1948). Este índice (H) es usado habitualmente en estudios que analizan la diversidad ecológica. En estudios sociales ha sido utilizado mucho menos (ver Sarma y Das, 2004 o Sheskin y Hartman, 2019). Su cálculo se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$H_i = -\sum_{s=1}^{S} p_{si} \cdot log(p_{si})$$

donde:

H_i es el índice Shannon para el barrio *i*,

p_{si} es la proporción de residentes que pertenecen al grupo social seleccionado *s* que residen en el barrio *i*,

S es el conjunto de grupos sociales.

El índice varía de 0 a infinito, donde 0 representa una población perfectamente homogénea, mientras que los valores más altos son simplemente representativos de una mayor heterogeneidad.

Este índice se calcula habitualmente para analizar el grado de mezcla social que existe en el interior de cada unidad espacial. Sin embargo, en la realidad los límites de las unidades espaciales no actúan como fronteras infranqueables dentro de las que la población está confinada. Al contrario, la "vida de barrio" se extiende también a barrios vecinos, sobre un determinado radio de acción. Por eso, proponemos aplicar el índice de Shannon no para analizar la diversidad social en el interior de cada barrio, sino en entornos locales sobre los que la población desarrolla su "vida de barrio". Para ello calculamos el índice de Shannon sobre toda la población del entorno de cada unidad espacial, considerando un radio de distancia de 1 Km (equivalentes a unos 15 minutos a pie) y ponderando por el inverso de la distancia, de forma que damos más peso a la población de las unidades más próximas (con las que es más probable la interacción social) y menos a las de las más lejanas (con las que esa interacción es menos probable). El indicador propuesto lo hemos denominado Índice de Shannon con Distance-Decay (DDH).

3.4. Movilidad (apertura)

A diferencia de los indicadores de segregación residencial, que son estáticos por naturaleza, los indicadores que contemplan la segregación como un proceso dinámico deben tener en cuenta la movilidad diaria de la población. La exposición de la población de un estrato social a otros estratos sociales (y, por lo tanto, la probabilidad de interacción entre miembros de diferentes estratos) depende en gran medida de la movilidad diaria de la población de los diferentes estratos. Se proponen dos indicadores de movilidad para analizar el grado de apertura de los habitantes de cada barrio y estrato social hacia el resto de la ciudad. Por un lado se mide la intensidad del grado de apertura de un barrio como el porcentaje de viajes externos de cada barrio a barrios de distinto estrato al suyo (viajes de mezcla social). Finalmente, se calculan las distancias recorridas en esos viajes de mezcla social.

4. RESULTADOS

4.1. Concentración

Los estratos sociales se disponen siguiendo sucesivas aureolas periferia-centro, desde las zonas más elevadas de las laderas (donde se localizan los estratos sociales más desfavorecidos) hasta las áreas centrales del fondo del valle (donde habitan las clases medias y altas). Además se manifiesta un gradiente norte-sur, de forma que el nivel de ingresos tiende a crecer de norte a sur (Figura 3 izquierda). Así, el estrato de menor nivel de ingresos (1) se concentra en los bordes noroeste y noreste del municipio. El estrato 2 resulta predominante en una segunda aureola hacia el interior, mientras que el Estrato 3 se localiza en áreas próximas al fondo del valle en la mitad norte y algunos barrios del suroeste. La población del estrato 4 es predominante en los barrios del centro. Finalmente, los barrios más adinerados (Estrato 6) se concentran en el sureste del municipio, mientras que el estrato 5 se localiza tanto en el centro-oeste como en el sureste. Los cambios en el cociente de localización entre la noche y el día según estratos (Figura 3 derecha) muestran que la población se relocaliza hacia los barrios más próximos y hacia los barrios del fondo del valle. Pero mientras que los estratos 1 y 2 tienden a relocalizarse sobre todo en la mitad norte del municipio, el estrato 3 lo hace prácticamente sobre todo el municipio, y el resto de los estratos excluyen a los barrios del norte como espacios de actividad. La población del estrato 6 (la población más favorecida) se mantiene un reducido número de barrios del centro y sur de la ciudad. Los coeficientes de variación de los valores de los coeficientes de localización de cada estrato en la noche y en el día revelan que los estratos de mayores ingresos (5 y 6) son los que viven más concentrados espacialmente, tanto en el día como en la noche. Además, el grado de concentración espacial de todos los estratos sociales disminuye durante el día.

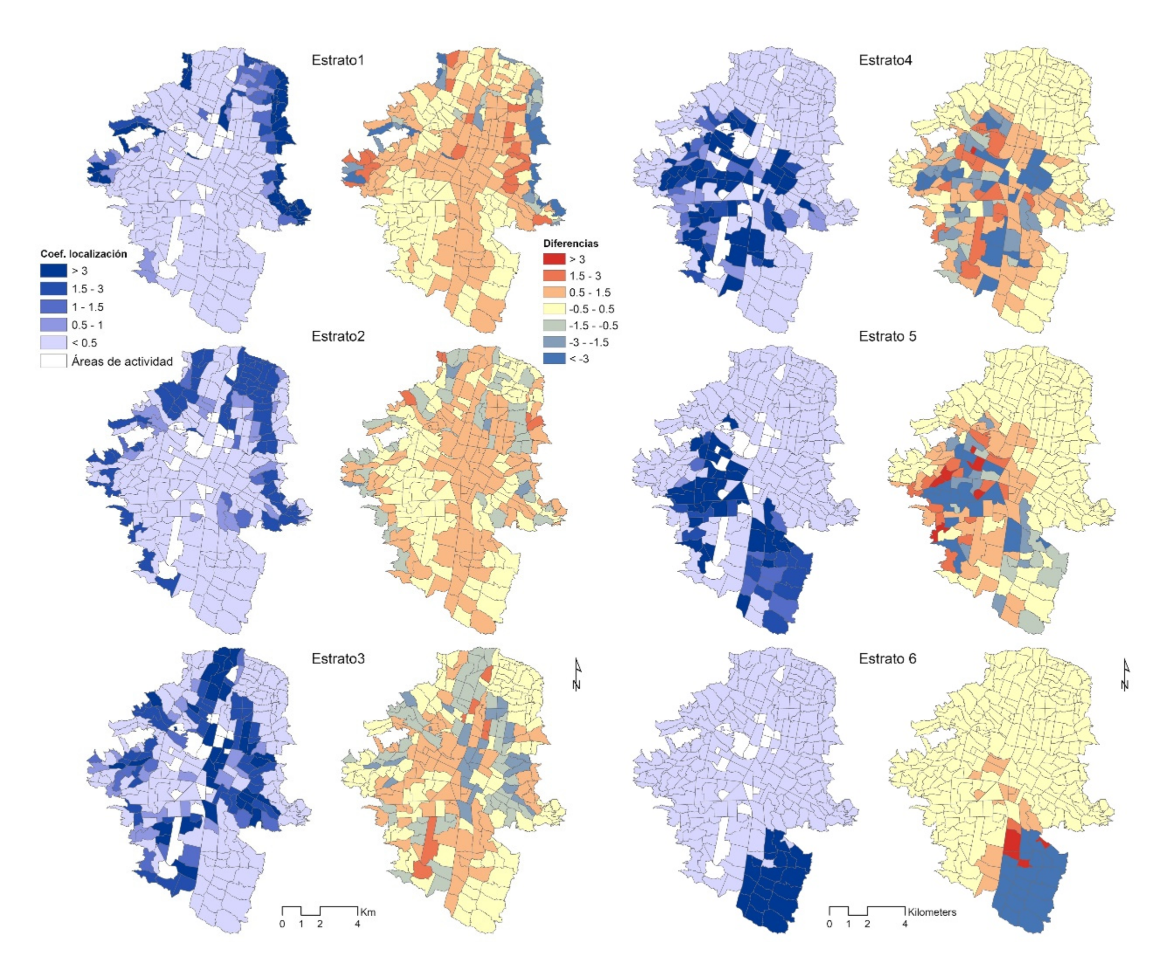


Figura 3. Coeficiente de localización de la población de cada estrato (filas) en cada barrio en la noche (izquierda) y cambios entre la noche y el día (derecha). Fuente: Elaboración propia

4.2. Agrupamiento (*Clustering*)

El Índice de Moran Global indica una marcada autocorrelación espacial positiva en todos los estratos sociales (tanto en la noche como en el día) (Tablas 1 y 2).

Tabla 1. Índice global de Moran según estratos sociales: noche

	Estrato 1	*Estrato 2*	*Estrato 3*	*Estrato 4*	*Estrato 5*	*Estrato 6*
Índice de Moran:	0,594260	0,477933	0,371989	0,286071	0,400216	0,365052
Índice esperado:	-0,003731	-0,003731	-0,003731	-0,003731	-0,003731	-0,003731
Varianza:	0,001118	0,001133	0,001135	0,001118	0,001103	0,001088
Valor z:	17,881416	14,312412	11,150828	8,668499	12,165428	11,178735
Valor p:	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Índice global de Moran según estratos sociales: día

	Estrato 1	*Estrato 2*	*Estrato 3*	*Estrato 4*	*Estrato 5*	*Estrato 6*
Índice de Moran:	0,827137	0,831332	0,732913	0,834656	0,823340	0,403601
Índice esperado:	-0,003731	-0,003731	-0,003731	-0,003731	-0,003731	-0,003731
Varianza:	0,001111	0,001131	0,001135	0,001132	0,001119	0,001080
Valor z:	24,922183	24,833590	21,864572	24,918737	24,726716	12,396457
Valor p:	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Fuente: Elaboración propia

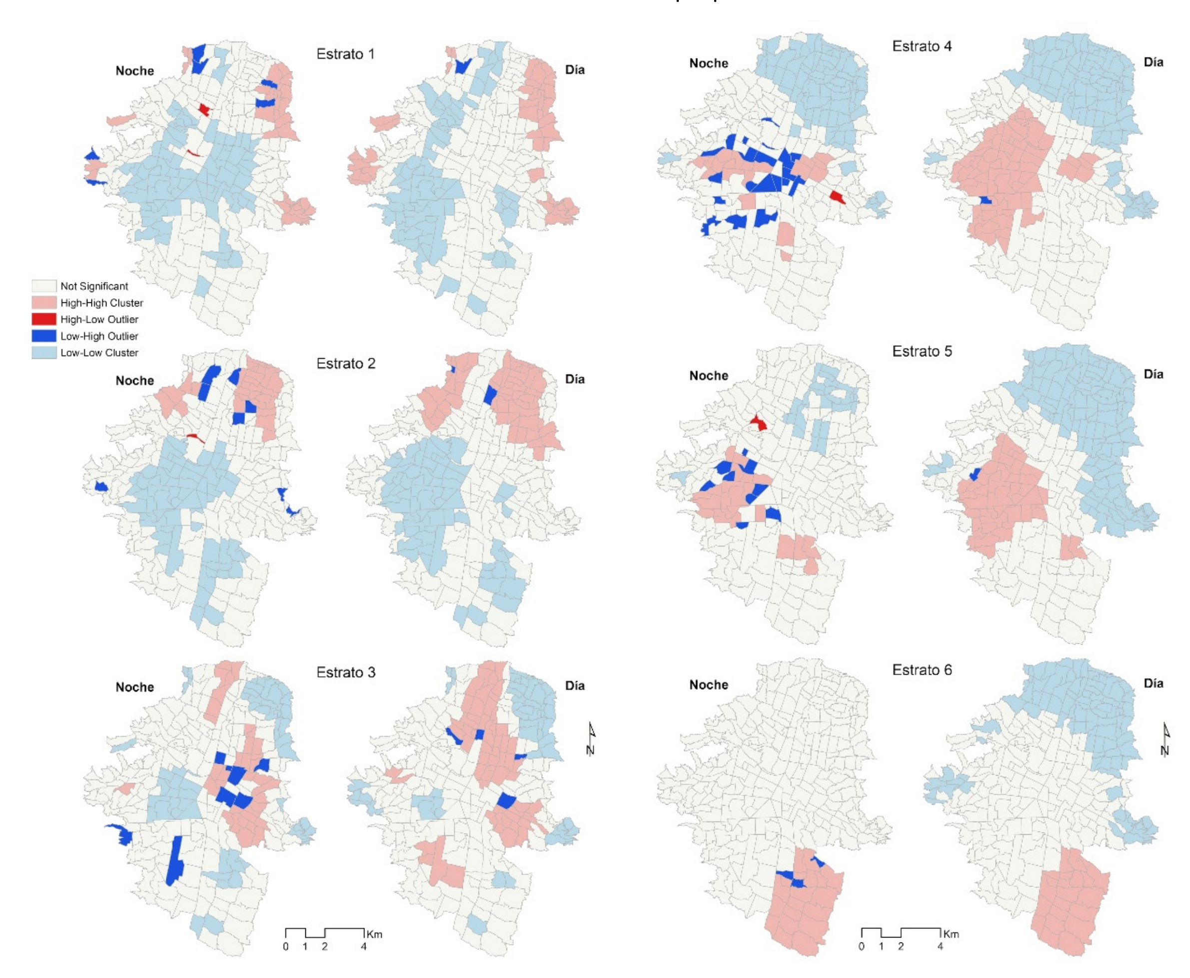


Figura 4. Resultados del análisis LISA. Izquierda: noche. Derecha: día. Fuente: Elaboración propia

En todos los estratos sociales los valores z son más altos durante el día que durante la noche, lo que significa que los valores altos y/o los valores bajos están más agrupados espacialmente durante el día que durante la noche. El estrato social 1 (muy bajo nivel de ingresos) es el que presenta un valor z más alto durante la noche, lo que significa que este estrato es el que exhibe el mayor grado de agrupamiento espacial (mayor segregación).

Esta tendencia global se refleja en los mapas resultantes del análisis LISA (Figura 4). Todos los mapas muestran patrones más simples durante el día que durante la noche, con una mayor superficie ocupada por los *clusters* HH y LL (autocorrelación espacial positiva) y una reducción del área ocupada por los valores atípicos HL y LH (autocorrelación espacial negativa). Así, por ejemplo, en el mapa del estrato 1 durante la noche se pueden observar dos *outliers* HL en el centro-norte de la ciudad. Son enclaves de bajo nivel de ingresos rodeados de barrios de ingresos más altos y por lo tanto con mayor potencial de interacción social que los clusters HH situados en la periferia noreste y noroeste. Esos dos enclaves desaparecen como tales durante el día, debido a que durante el día parte de su población abandona el barrio, a la vez que población de otros estratos llega al barrio, y lo mismo ocurre en los barrios vecinos. Los estratos de ingresos medio y medio-alto (3, 4 y 5) son los que muestran más *outliers* durante la noche, sobre todo LH, pero la mayor parte de estos *outliers* desaparecen durante el día. El estrato 6 es el que exhibe unas estructuras espaciales más simples, tanto durante la noche como durante el día, destacando el *cluster* HH en el sureste de la ciudad.

4.3. Exposición

El cálculo del índice de Shannon con *Distance-decay* permite obtener un indicador de exposición para todos los barrios, independientemente de que tengan o no población durante la noche. Los patrones espaciales de exposición durante la noche (Figura 5a) son bastante complejos, si bien se observa que los barrios con menor exposición (valores inferiores a 1) tienden a ser predominantes tanto en el norte (estratos sociales bajos) como en el sur (estratos sociales altos), mientras que los barrios con mayor mezcla social se localizan en el centro y en el oeste de la ciudad (donde predominan los estratos sociales medios o medio-altos). Durante el día (Figura 5b) los valores del indicador son mucho más altos que en la noche, revelando un aumento generalizado de la exposición. El centro y el sur de la ciudad, particularmente en los barrios del fondo del valle que concentran más empleos y servicios y se convierten en espacios con alta probabilidad de contacto entre población de estratos sociales diferentes. El mapa de cambios en el índice de Shannon entre la noche y el día (Figura 5c) revela que en todos los barrios se produce un aumento de la mezcla social durante el día, si bien la intensidad de esos cambios es muy variable. Los mayores incrementos en los valores exposición se registran en los barrios del fondo del valle localizados en el centro y sur de la ciudad, que son los que atraen más viajes, mientras que el resto de los barrios tienden a registrar cambios más moderados.

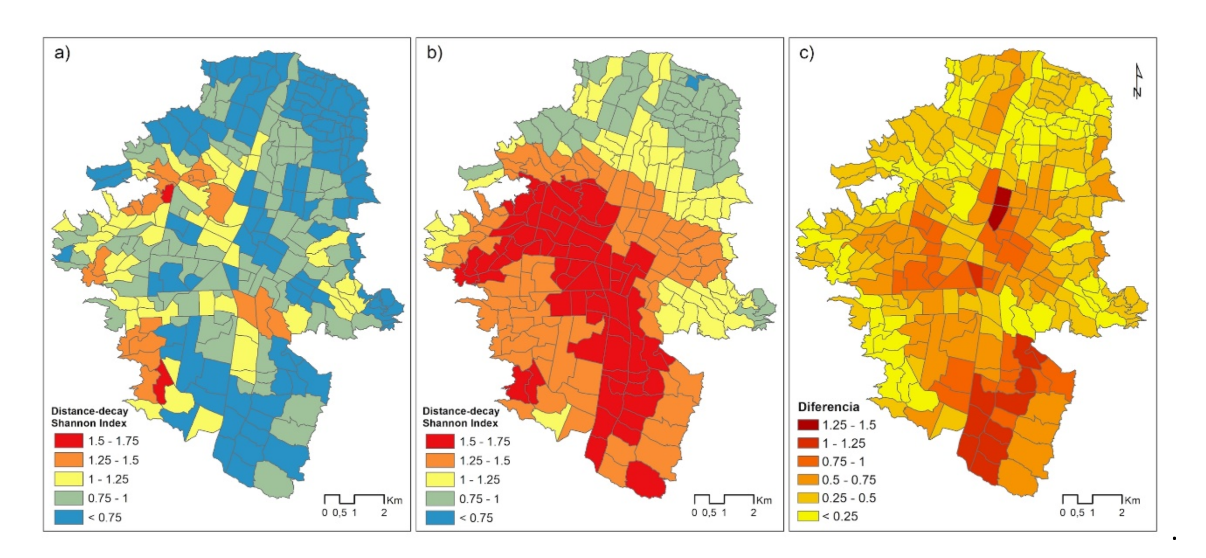


Figura 5. Índice de Shannon con *Distance-decay* según barrios durante la noche (a), el día (b) y cambios entre la noche y el día (c), calculado con un radio de 1 Km y ponderando por el inverso de la distancia. Fuente: Elaboración propia.

4.4. Movilidad (apertura)

La Figura 6a muestra que el porcentaje de viajes a barrios de diferente estrato es mayor en las zonas

de las laderas, mientras que los residentes en los barrios ricos del sureste tienden a desplazarse a zonas del mismo estrato. Como era de esperar, la distancia promedio recorrida por los viajes de mezcla socioespacial (Figura 6b) es mayor en los barrios periféricos que desde los centrales. Además, debido al déficit de empleos y actividades en las laderas del norte, las distancias desde esos barrios son desproporcionadamente mayores.

A medida que disminuye el estrato de ingresos aumenta el porcentaje de viajes de "mezcla socioespacial", así como el promedio de distancia recorrida por habitante (Tabla 3). Los residentes de zonas de estrato alto encuentran más oportunidades para sus actividades diarias (incluido el empleo) en su barrio o cerca, en barrios del mismo estrato. En cambio, los barrios de estratos bajos tienen menos empleos y equipamientos, por lo que durante un día sus habitantes necesitan viajar para satisfacer sus necesidades. Sus destinos suelen ser más lejanos y en barrios de estratos más altos. La mayor mezcla social durante el día se debe principalmente a la movilidad de la población de los estratos de bajos ingresos.

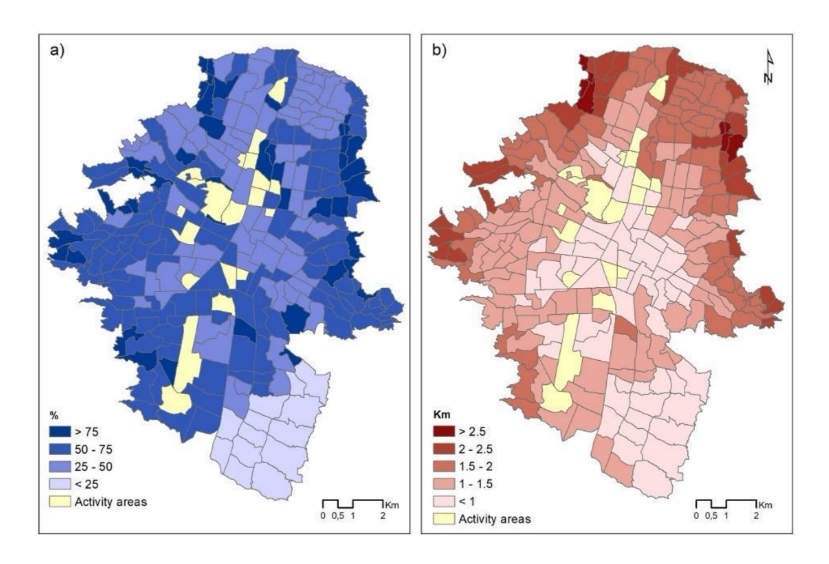


Figura 6. Indicadores de movilidad: Porcentaje de "viajes de mezcla socioespacial" (a) y distancia media (km) recorrida por habitante en "viajes de mezcla socioespacial" (b). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Indicadores de movilidad

Estratos	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*Media Ponderada*
Viajes de mezcla socioespacial (%)	78,4	59,3	47,9	53,1	59.0	23,3	56,2
Distancia media (km) recorrida por habitante en viajes de mezcla socioespacial	2,31	1,82	1,24	1,03	1.19	0,85	1,51

Fuente: Elaboración propia

5. CONSIDERACIONES FINALES

En esta comunicación hemos estudiado de las variaciones de la segregación social desde una perspectiva espacio-temporal utilizando datos de telefonía móvil. Para ello se calculan indicadores de segregación social para el día y para la noche, y se utilizan de forma complementaria indicadores de movilidad que ayudan a entender los cambios temporales en la segregación. La segregación social disminuye durante el día. En todos los estratos sociales durante el día disminuye el grado de concentración espacial en el interior de los barrios, aumenta la mezcla social en los entornos locales (índice Shanon) y esa mayor mezcla social hace que en el entorno extendido se suavicen los contrastes locales y aumente la extensión de los *clusters* espaciales (autocorrelación espacial), con lo que emergen de forma más evidente las tendencias generales de *clustering* y los contrastes sociales norte-sur y centro-periferia.

El aumento de la exposición durante el día se produce sobre todo por efecto de la movilidad de la

población de los estratos sociales con menor nivel de ingresos. La movilidad mitiga la segregación observada durante la noche, pero a costa de un gran esfuerzo de la población de los estratos sociales bajos, que tienen que desplazarse a trabajar y a realizar actividades a otros barrios. Sin embargo, existen diferencias notables entre barrios donde la población de bajo nivel de ingresos es predominante. La población de algunos de estos barrios (noreste de la ciudad) muestra un comportamiento orientado hacia el exterior y aprovecha las oportunidades disponibles en otros muchos barrios de la ciudad, mientras que la población de otros barrios desfavorecidos (noroeste) muestra un comportamiento mucho más cerrado, lo que apunta a procesos de *guetificación*. La mejora del transporte público en los barrios de bajo nivel de ingresos contribuye a favorecer la integración de su población en la vida de la ciudad, pero no es una condición suficiente, ya que tanto los barrios del noroeste como los del noreste cuentan con sistemas de Metrocable.

AGRADECIMIENTOS

Financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación de España y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (Proyecto DynMobility RTI2018-098402-B-I00) y MCIN-AEI/10.13039/501100011033/ (Proyecto NEWGEOMOB - PID2020-116656RB-I00).

Una versión ampliada de este texto se ha publicado en Moya-Gómez, B., Stępniak, M., García-Palomares, J.C., Frías-Martínez, E. and Gutiérrez, J. (2021). Exploring night and day socio-spatial segregation based on mobile phone data: The case of Medellin (Colombia). Computers, Environment and Urban Systems, 89 (September 2021), 101675.

6. BIBLIOGRAFÍA

Anselin, L. (2010). Local Indicators of Spatial Association-LISA. *Geographical Analysis,* 27, 93–115. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x

Bauder, H. y Sharpe, B. (2002). Residential segregation of visible minorities in Canada's gateway cities. *The Canadian Geographer*, 46, 204–222. https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.2002.tb00741.x

Chakraborty, J. y Armstrong, M.P. (1997). Exploring the Use of Buffer Analysis for the Identification of Impacted Areas in Environmental Equity Assessment. *Cartography and Geographic Information Systems*, 24, 145–157. https://doi.org/10.1559/152304097782476951

Heringa, A., Bolt, G., Dijst, M. y van Kempen, R. (2014). Individual Activity Patterns and the Meaning of Residential Environments for Inter-Ethnic Contact. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie* 105, 64–78. https://doi.org/10.1111/tesg.12046

Krivo, L.J., Washington, H.M., Peterson, R.D., Browning, C.R., Calder, C.A. y Kwan, M.-P. (2013). Social Isolation of Disadvantage and Advantage: The Reproduction of Inequality in Urban Space. *Social Forces,* 92, 141–164. https://doi.org/10.1093/sf/sot043

Kwan, M.-P. y Weber, J. (2003). Individual Accessibility Revisited: Implications for Geographical Analysis in the Twenty-first Century. *Geographical Analysis,* 35, 341–353. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2003.tb01119.x

Östh, J., Shuttleworth, I. y Niedomysl, T. (2018). Spatial and temporal patterns of economic segregation in Sweden's metropolitan areas: A mobility approach. *Environment and Planning A*, 50, 809–825. https://doi.org/10.1177%2F0308518X18763167

Sarma, P. y Das, D. (2004). Application of Shannon's index to study diversity with reference to census data of Assam. Asian Journal of Management Research, 5(4), 620-628.

Shannon, C.E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell Labs Technical Journal*, 27, 379–423. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

Sheskin, I.M. y Hartman, H.J. (2019). Religious Diversity and Religious Participation in U.S. Jewish Communities. *The Professional Geographer*, 71, 39–51. https://doi.org/10.1080/00330124.2018.1455520



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 495-504

Habana Ciudad Solar: propuesta metodológica para la estimación del potencial de energía solar

A.M. Martín Ávila[1], J. Domínguez Bravo[1], L.F. Zarzalejo Tirado[1]

[1] División de Energías Renovables, Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Avda. Complutense 40, 28040 Madrid.

anamaria.martin@ciemat.es, javier.dominguez@ciemat.es, lf.zarzalejo@ciemat.es

RESUMEN: El potencial de energía solar en una ciudad depende de la superficie disponible en los tejados para la instalación de paneles, de la radiación incidente sobre los mismos y de la energía que puedan generar. Para conocer este potencial, es preciso contar con información geográfica de una resolución y calidad adecuadas. Estas condiciones no se dan en la ciudad de La Habana (Cuba), lo que implica la necesidad de diseñar una metodología específica que palie estas carencias. Para ello, se ha analizado la información existente en Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) internacionales con coberturas de datos para la región. Las imágenes Sentinel-2, Google Earth y OpenStreetMap son los recursos básicos con la que hemos desarrollado esta nueva metodología. La interpretación de las ortoimágenes nos ha permitido analizar la densidad de edificación, observar su tipología e identificar las formas de los tejados. Estos datos nos proporcionan una base suficiente para estimar la superficie potencial de captación sobre los tejados, tomando como unidad de representación las manzanas. Otro bloque es la evaluación de las zonas arboladas que generan sombras y limitan la producción de energía solar. Para esta tarea, se ha aplicado el índice de vegetación NDVI a las imágenes Sentinel-2. Por último, la radiación solar se calcula sobre la base de un modelo topográfico al carecer de un MDS de edificios. Con el desarrollo de esta metodología se inicia la primera fase del proyecto. La implementación completa permitirá obtener una primera aproximación al potencial solar del municipio de Guanabacoa, que será seguido, dentro de pocos meses, con estudios que evalúen nuevas áreas de La Habana.

Palabras-clave: energía solar, OpenStreetMap, Sentinel-2, NDVI, planificación urbana.

1. INTRODUCCIÓN

Los objetivos de desarrollo sostenible en Cuba para el 2030 están encaminados a proporcionar servicios energéticos asequibles y no contaminantes, aumentar considerablemente la presencia renovable hasta un 24 % en la producción energética y promover la eficiencia energética (Ministerio de Energía y Minas, 2021). Dentro de este marco, el proyecto Habana Ciudad Solar, financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), tiene como uno de sus objetivos fundamentales la dotación de un conocimiento científico y una metodología propia para el análisis del potencial solar de toda la provincia de La Habana (Cuba).

Para este tipo de estudios, es habitual el empleo de cartografías base urbanas catastrales que proporcionan la localización de los edificios, y también, modelos digitales de superficies (MDS) con los que definir la configuración del entorno urbano, identificar la forma de los tejados y determinar la radiación solar. En la literatura se pueden encontrar trabajos relacionados que han considerado diferentes unidades geográficas de análisis, a escala nacionales y regionales (Izquierdo et al., 2008; Sun et al., 2013) o local para ciudades o distritos (Byrne et al., 2015). En la actualidad, los trabajos relacionados con la evaluación del potencial solar emplean la tecnología LIDAR para la obtención de modelos tridimensionales de los edificios (Li et al., 2015; Gergelova et al., 2020). En este campo, el grupo de Tecnologías de la Información Geográfica y Energías Renovables del CIEMAT (gTIGER), trabaja en una línea de investigación dirigida a implementar herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para integrar los recursos renovables y fomentar el uso de la energía solar en las ciudades. Uno de sus proyectos, gSolarRoof (CIEMAT, 2020) promueve el diseño y desarrollo de modelos geográficos para evaluar la capacidad de los entornos urbanos de generar energía mediante la instalación de paneles solares en los edificios (Martín Ávila et al., 2016; 2021).

Apoyándose en los conocimientos adquiridos sobre cuáles son las variables que deben aplicarse en el análisis del aprovechamiento de la energía solar, hemos desarrollado un procedimiento para la obtención del mapa solar del municipio de Guanabacoa en la Provincia de La Habana (Cuba). La principal dificultad ha consistido en plantear la aplicación de la metodología del modelo gSolarRoof cuando se dispone de un conjunto de datos completamente diferente. En esta ponencia presentaremos la metodología desarrollada para el estudio del potencial solar de La Habana que incluirá la generación de energía fotovoltaica y térmica. Primero, se presenta una síntesis de las principales capas de datos recopiladas tras la revisión de las fuentes de información en las que se fundamentará la metodología. A continuación, la descripción del procedimiento para la estimación de la superficie de tejado disponible para las instalaciones solares. Esta sección mostrará los elementos que se han tenido en cuenta en la caracterización de la estructura urbana, el proceso para identificar las zonas con arbolado que puedan originar sombras a partir de la clasificación de las imágenes de satélite Sentinel-2, y los parámetros que se aplicarán para la obtención de la superficie potencial de captación en los tejados. Finalmente, se describe el cálculo de la radiación solar global anual en la zona.

2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS UTILIZADOS

Guanabacoa es un municipio que forma parte de la provincia de La Habana, situado al este de la Bahía de La Habana en la zona norte de la región occidental de Cuba (latitud 23°6’29’’N y longitud 82°13’57’’O). Su relieve está formado por llanuras con suaves colinas (altura máxima 160 m) y su clima tropical se caracteriza por la influencia de su proximidad al mar. La temperatura media anual es de 25 °C, con mínimas en enero de 21,8 °C y máximas en agosto de 27,6 °C. La precipitación media es de 1.200 milímetros, siendo los meses más lluviosos mayo y octubre mientras que marzo recibe las precipitaciones mínimas (Guanabacoa, 2021).

Guanabacoa, con un área de 129,48 km² es uno de los municipios de mayor extensión de la provincia y presenta una superficie urbanizada de aproximadamente el 16 %, concentrada en la zona oeste del mismo. El municipio cuenta con 127.445 habitantes (Oficina Nacional de Estadística e Información, 2021) y la densidad de población es de 984,28 hab/Km², la menor de la provincia. Guanabacoa está constituida por ocho consejos populares: Villa I, Villa II, Mañana-Habana Nueva y Roble-Chibás son las zonas de mayor urbanización, D’Beche-Nalón y La Jata-Naranjo representan zonas de urbanización intermedia y Minas-Barreras junto con Peñalver-Bacuranao comprenden la zona rural del municipio.

Para llevar a cabo el estudio geográfico del potencial solar primero se necesita conocer cuál es la información de partida de la que se dispone. Los SIG nos proporcionan potentes herramientas de cálculo, pero necesitan de datos que nos permitan hacer el análisis. En este caso nos hemos enfrentado a la dificultad de realizar un estudio urbano con escasa disponibilidad de información. La búsqueda se ha tenido que realizar en diferentes IDE y bases de datos cartográficas internacionales que, aunque nos pueden proporcionar datos globales y cubren la zona del Caribe, no suelen contener información urbana a la escala que necesitamos.

La NASA, el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), servicios de la Unión Europea (UE), OpenStreetMap o Google Earth, han sido algunos de los recursos consultados. Finalmente, teniendo en cuenta la condición de emplear datos de acceso libre, las capas de datos que se han obtenido proceden, principalmente, de las siguientes fuentes de información:

- Proyecto de cartografía colaborativa OpenStreetMap (2018): Base cartográfica con información del trazado de la red de carreteras, usos del suelo, localización de edificios y puntos de interés.
- Programa Copernicus para la monitorización de la Tierra de la Agencia Espacial Europea (2021): Serie de 15 imágenes de satélite multiespectrales de la misión Sentinel-2 del periodo 2017 a 2021. Las imágenes empleadas son las de nivel 2A de procesamiento que se encuentran ortorectificadas y a las que ya se le han aplicado correcciones atmosféricas.
- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) (2017): Modelo Digital de Superficie (MDS) con una resolución de 30 metros generado a partir de las imágenes obtenidas del Advanced Land Observing Satellite ‘DAICHI’ (ALOS).
- Sistema de Información Geográfica Fotovoltaico PVGIS de la Comisión Europea (2019): Proporciona información sobre radiación solar y datos relacionados con instalaciones fotovoltaicas. Para la localización de Guanabacoa hemos consultado los datos mensuales de irradiación global horizontal en el periodo 2005 a 2015 de la base de datos PVGIS-NSRDB. Los datos de radiación solar disponibles están calculados a partir de valores procedentes de la Base de Datos Nacional de Radiación Solar (NSRDB) del Laboratorio Nacional del Energías Renovables de Estados Unidos.

3. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL POTENCIAL SOLAR URBANO

Para calcular el potencial solar en un área urbana se necesita, básicamente, determinar tres elementos (Figura 1): (1) Conocer cuál es la superficie de tejados disponible para la instalación de los módulos solares (2) establecer la radiación solar en la zona, y (3) calcular la producción de energía que puede obtenerse. En esta sección presentaremos los avances realizados en la metodología desarrollada hasta el momento correspondiente a los dos primeros puntos.

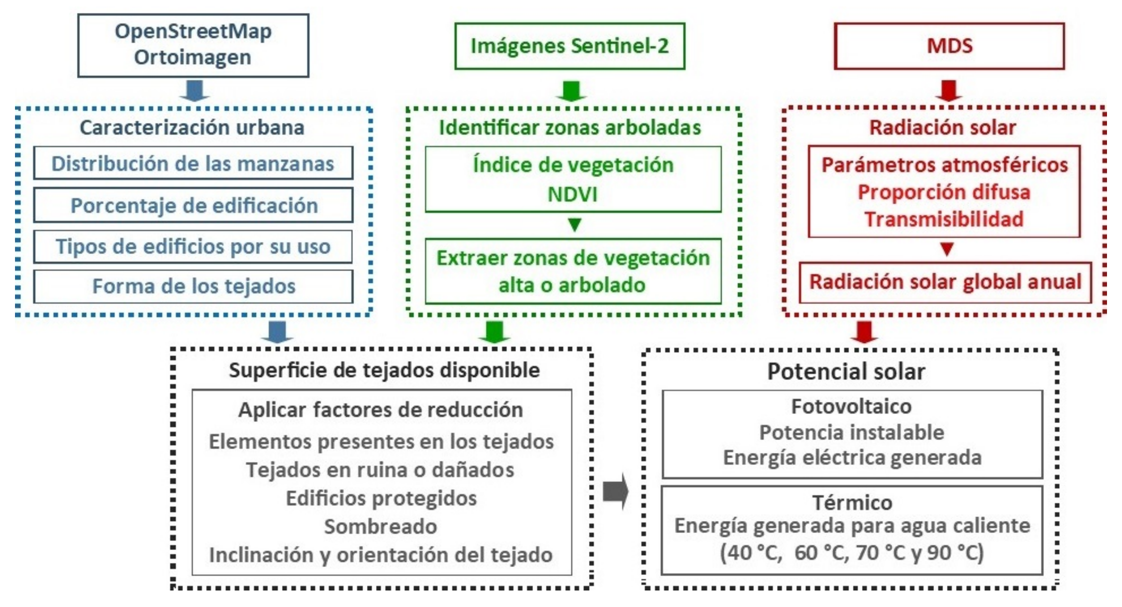


Figura 1. Esquema general para determinar el potencial solar urbano. Divisiones de acimut (opcional) El número de divisiones utilizadas para crear sectores de cielo en el mapa de cielo. El valor predeterminado es ocho divisiones (en relación con el norte). Los valores válidos deben ser múltiplos de 8. Los valores deben ser mayores que cero y menores que 160. Tipo de modelo difuso (opcional) Tipo de modelo de radiación difusa.

STANDARD_OVERCAST_SKY— Modelo de difusión nublada estándar. El flujo de radiación difusa entrante varía con el ángulo cénit.

Proporción difusa (opcional)

La proporción del flujo de radiación normal global que es difusa. Los valores varían de 0 a 1.

Este valor se debe establecer de acuerdo con las condiciones atmosféricas. El valor predeterminado es 0,3 para condiciones de cielo generalmente claro.

Transmitividad (opcional)

La fracción de la radiación que pasa a través de la atmósfera (promediada para todas las longitudes de onda). Los valores varían de 0 (sin transmisión) a 1 (transmisión completa).

El valor predeterminado es 0,5 para un cielo generalmente claro.

Ráster de radiación directa de salida (opcional)

El ráster de salida que representa la radiación solar entrante directa para cada ubicación.

La salida tiene unidades de vatios hora por metro cuadrado (WH/m2).

Ráster de radiación difusa de salida (opcional)

El ráster de salida que representa la radiación solar entrante difusa para cada ubicación.

La salida tiene unidades de vatios hora por metro cuadrado (WH/m2).

Ráster de duración directa de salida (opcional)

El ráster de salida que representa la duración de la radiación solar entrante directa.

La salida tiene unidades de horas.

3.1. Determinación de la superficie de tejados disponible

La evaluación del potencial solar para los edificios necesita establecer cuál es la superficie de tejados aprovechable para la instalación de paneles solares. Es habitual calcular dicha superficie a partir de la información extraída de la cartografía catastral, cuyas bases de datos nos facilitan la localización de los edificios e información útil como el tipo de construcciones o su uso (Agugiaro et al., 2012; Byrne et al., 2015). Con estos datos podríamos disponer de la superficie construida de la zona urbana, sin embargo, en el caso de Guanabacoa la única cartografía es la proporcionada por OpenStreetMap que, para esta zona urbana, únicamente dispone de los polígonos de algunos edificios, insuficientes para poder establecer el área edificada. Otra opción sería establecer el área construida mediante la clasificación de las imágenes de satélite (Bramhe et al., 2018; Rouibah y Belabbas, 2020), aunque con la resolución de las imágenes Sentinel-2 podría diferenciarse únicamente entre zona construida, vegetación y masas de agua del municipio. En Guanabacoa hemos utilizado la capa de datos con el trazado de las calles de OpenStreetMap y las ortoimágenes para generar un entramado urbano formado principalmente por las manzanas con algunas subdivisiones de las mismas cuando la tipología de los edificios lo ha requerido.

Establecida la unidad de representación se procede a la descripción y caracterización del entorno urbano para poder determinar el área construida por cada manzana y la superficie de tejados. No toda el área de los tejados puede emplearse para la producción de energía solar. La forma de las cubiertas, las sombras generadas por los árboles o los edificios, la ocupación del espacio por otras instalaciones o estar destinados a diferentes aplicaciones, disminuye la superficie útil. Para estimar finalmente el área utilizable se aplicarán coeficientes de reducción sobre la superficie construida.

3.1.1. Caracterización del entorno urbano

Esta fase incluye el proceso de creación de la base de datos asociada a las manzanas. La información incorporada a la misma se ha obtenido fundamentalmente a partir de la revisión de las ortoimágenes de la zona urbana de Living Atlas de ArcGIS Online (ESRI, 2021) y de Google Earth, de algunos datos de usos del suelo urbano y la información puntual de la localización de edificios de servicios y equipamiento. El proceso de caracterización primero determina la superficie edificada total de las manzanas utilizando un valor de cobertura u ocupación del suelo (OS). El porcentaje de la superficie urbana ocupada por los edificios se establece mediante la interpretación de las ortoimágenes del municipio. Al tratarse de una estimación se han establecido unos rangos para el porcentaje de superficie construida, con una OS mínima y máxima para cada tipo de ocupación. Los diferentes tipos (Figura 2) han sido definidos tomando como referencia las clases de ocupación del suelo identificadas para zonas urbanas descritas en Urban Atlas (UE, 2016): Nula (OS = 0), muy baja (0 > OS ≤ 10), baja (10 > OS ≤ 30), media (30 > OS ≤ 50), alta (50 > OS ≤ 80) y muy alta (OS > 80).

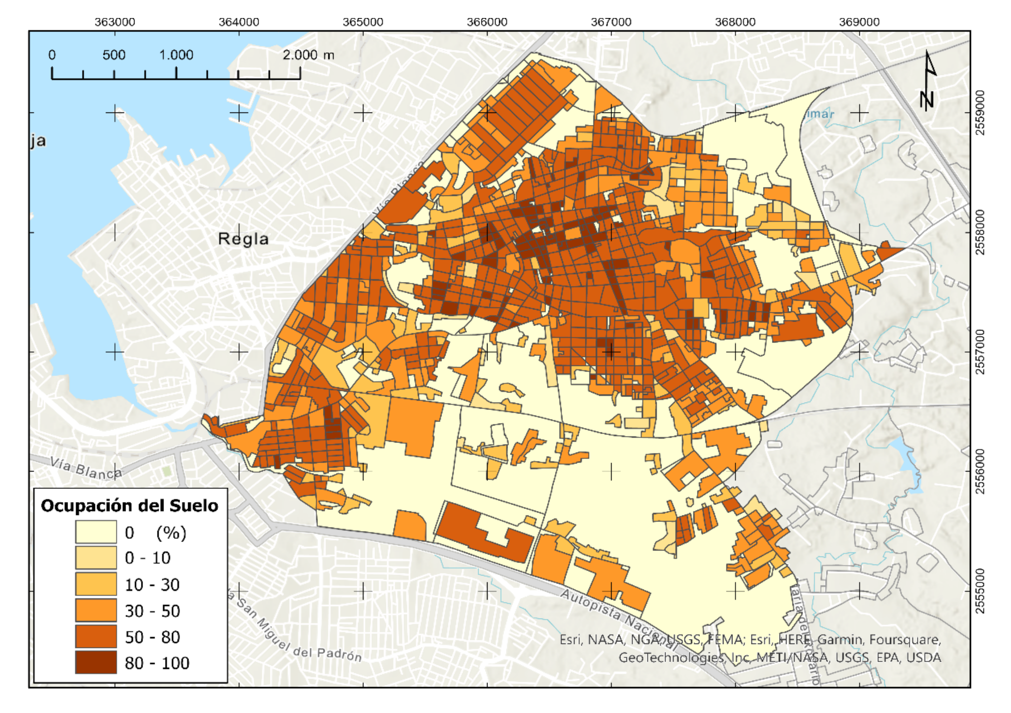


Figura 2. Mapa del porcentaje de ocupación del suelo por edificaciones. Núcleo urbano de Guanabacoa.

Seguidamente, se clasifica las manzanas con construcciones teniendo en cuenta el uso general que tiene asociado cada tipo de edificio. Los edificios se dividen en tres tipos generales con sus subtipos: Industrial (industrial y agrícola/ganadero), residencial (apartamentos, heterogéneo y aislado) y de servicios (administración, comercial, cultural, educación, sanitario, deportivo, religioso, transporte, cementerio y penitenciario). Por último, se identifican los tejados por sus características y distribución. Se incluye un campo con la descripción del tipo de tejados dominante en cada manzana (complejo, inclinado y plano). La clase complejos corresponde a manzanas con los tejados cuya forma es difícil de identificar con la resolución de la imagen.

3.1.2. Identificación de las zonas arboladas

La presencia de zonas arboladas que pueden generar sombras que dificultan el aprovechamiento solar se establece mediante el cálculo de índices espectrales de vegetación de las imágenes Sentinel-2. Uno de los índices habitualmente empleado es Índice Diferencial de Vegetación Normalizado o NDVI. Está asociado con el contenido de vegetación, su estado de desarrollo y la vitalidad de la misma. Este índice aprovecha el diferente comportamiento de dos bandas del espectro electromagnético, la absorción de la vegetación en la banda roja (RED) y la reflectividad en la banda infrarroja cercana (NIR) (Lillesand et al., 2004).

Este índice calcula los valores entre -1,0 y 1,0. Los valores altos de NDVI representan zonas que reflejan más en el espectro del infrarrojo cercano. Generalmente, los resultados positivos en el rango 0,2 y 1 representan la cobertura de vegetación donde los valores más elevados de NDVI corresponden una vegetación densa como los árboles. Para identificar las clases de vegetación Hashim et al. (2019) definen los valores umbrales NDVI de (0,2-0,5) para arbustos y pastizales, y (0,5-1,0) para los bosques urbanos templados y tropicales. Abutaleb et al. (2021) también presenta valores parecidos en la diferenciación, (0,25-0,5) para calidad de verde moderada, (0,5- 0,75) en alta calidad y (0,75-1) en calidad muy alta.

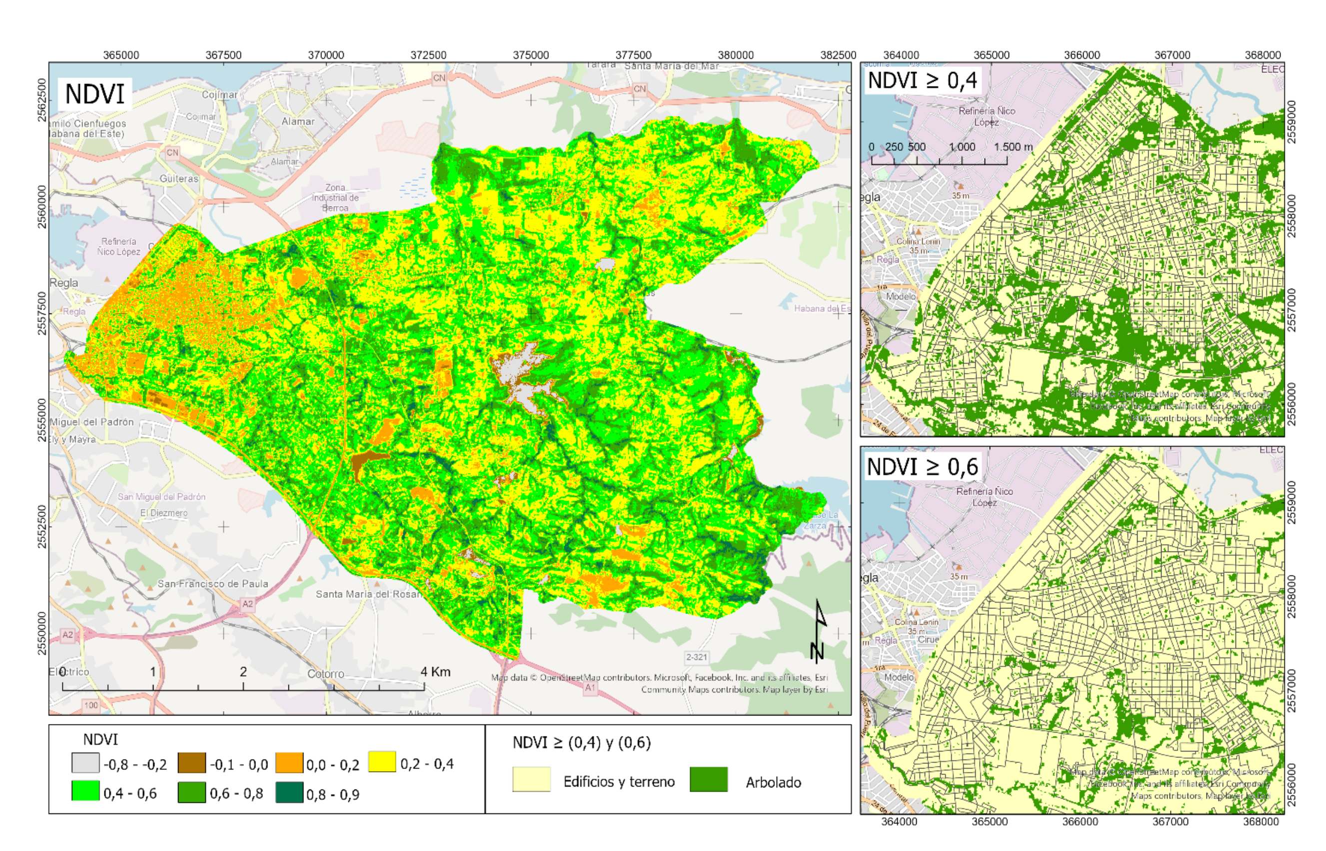


Figura 3. Resultados del índice de vegetación NDVI de la imagen Sentinel-2 correspondiente al 3 de abril de 2020.

Sin embargo, se trata de una aproximación general y siempre es importante considerar los cambios estacionales en la vegetación, el tipo de plantas y las características de la zona para interpretar adecuadamente los valores. Teniendo en cuenta el clima de Cuba con dos estaciones fundamentales: lluviosa (de mayo a octubre) y poco lluviosa (de noviembre a abril) (Instituto de Meteorología, 2022). Tomando como referencia de NDVI el valor umbral central de 0,5 para diferenciar entre edificios/terreno y vegetación alta (arbolado), se realizan pruebas de segmentación de la imagen con valores próximos al mismo, desde 0,4 a 0,6 con un

intervalo de 0,05. Los valores superiores a cada uno de los umbrales establecidos se identifican como arbolado. En el caso de estudio de Guanabacoa se ha analizado el índice NDVI de las 15 las imágenes Sentinel-2 disponibles para seleccionar aquella que proporcione los mejores resultados. Se revisará la precisión de los valores obtenidos de todas las imágenes para verificar cuáles son los rangos de NDVI y la imagen que obtengan los resultados más ajustados a las zonas arboladas de las manzanas urbanas. La figura 3 muestra un ejemplo de NDVI de la imagen del mes de abril para dos de los valores establecidos (0,4 y 0,6).

3.1.3. Evaluación de la precisión

La evaluación de la precisión de la clasificación del arbolado la realizamos con una matriz de confusión. En la matriz se representará el grado de coincidencia en la clasificación realizada entre un grupo de puntos de control y otro de referencia que representan el tipo real de terreno. La diagonal de la matriz corresponde a los puntos bien clasificados y el resto de celdas muestran la confusión, los errores de omisión y comisión (Ariza-López et al., 2018). Con la matriz de confusión se aplica dos índices globales, el porcentaje de acuerdo y el coeficiente Kappa. El acuerdo muestra el ratio del total de tipos clasificados correctamente y Kappa mide la concordancia entre los valores si se considera la parte de la clasificación que se produce de forma aleatoria. Estos índices oscilan entre 0 y 1. El valor 1 representa 100 % de exactitud.

La muestra de puntos de control del arbolado se realiza mediante la revisión de las ortoimágenes de la zona seleccionando 1250 puntos, considerándose dos tipos: edificado y suelo (Tipo 1) que representa zonas edificadas, explanadas y zonas sin vegetación, y vegetación alta o arbolado (Tipo 2) para las zonas arboladas y árboles aislados. En la localización de los puntos, al buscar árboles aislados de diferentes tamaños, señalar que se trata de un entorno urbano con escasa presencia de arbolado en su mayor parte y con árboles que pueden no tener la suficiente copa para el tamaño de píxel de 10 m de resolución de Sentinel-2.

De las 15 imágenes Sentinel-2, han sido seleccionadas 3 imágenes con un coeficiente Kappa superiores a 0,80 (Tabla 1). Los valores umbrales para la clasificación del arbolado que presentan están entre 0,40 y 0,50. Como las imágenes tienen valores muy parecidos de concordancia, finalmente se extraen varias manzanas del municipio con diferente cobertura de arbolado para acotar mejor los resultados del índice de vegetación NDVI y poder seleccionar la imagen más adecuada. Como base se utilizan los intervalos de OS de las manzanas urbanas, seleccionando 10 manzanas para cada intervalo. En la tabla 2 se muestran las dos imágenes, correspondientes al mes de abril de los años 2019 y 2020, que mejor se adaptan en la mayoría de las manzanas dependiendo de la OS. La diferencia más destacada entre las dos imágenes corresponde a las manzanas con baja OS, donde en el terreno despejado puede darse una mayor presencia de vegetación baja cuyo verdor puede mezclarse con el arbolado.

Tabla 1. Resultados para NDVI de los índices de acuerdo y coeficiente Kappa

Imagen	*Umbral 0,4*		*Umbral 0,45*		*Umbral 0,50*		*Umbral 0,55*		*Umbral 0,60*	
	Acuerdo	*Kappa*	*Acuerdo*	*Kappa*	*Acuerdo*	*Kappa*	*Acuerdo*	*Kappa*	*Acuerdo*	*Kappa*
GBCOA_1_20171215	0,85	0,65	0,83	0,62	0,81	0,55	0,79	0,47	0,76	0,37
GBCOA_2_20171220	0,74	0,41	0,74	0,37	0,73	0,31	0,72	0,25	0,71	0,20
GBCOA_3_20180325	0,89	0,75	0,86	0,66	0,83	0,56	0,78	0,40	0,74	0,26
GBCOA_4_20181026	0,72	0,34	0,72	0,31	0,72	0,29	0,72	0,25	0,71	0,19
GBCOA_5_20190129	0,90	0,79	0,92	0,82	0,91	0,81	0,90	0,77	0,88	0,72
GBCOA_6_20190429	0,91	0,80	0,90	0,76	0,87	0,70	0,85	0,62	0,82	0,53
GBCOA_7_20190718	0,89	0,76	0,89	0,75	0,88	0,72	0,86	0,67	0,83	0,60
GBCOA_8_20191130	0,86	0,69	0,86	0,69	0,86	0,68	0,85	0,64	0,83	0,60
GBCOA_9_20200403	0,93	0,83	0,90	0,77	0,87	0,68	0,83	0,57	0,79	0,44
GBCOA_10_20200408	0,89	0,75	0,88	0,70	0,85	0,61	0,81	0,51	0,78	0,40
GBCOA_11_20200508	0,84	0,60	0,78	0,40	0,73	0,23	0,69	0,09	0,67	0,03
GBCOA_12_20210103	0,84	0,66	0,86	0,69	0,86	0,68	0,85	0,65	0,84	0,61
GBCOA_13_20210212	0,87	0,71	0,87	0,69	0,86	0,66	0,84	0,60	0,81	0,52
GBCOA_14_20210324	0,90	0,77	0,88	0,72	0,85	0,64	0,82	0,55	0,79	0,44
GBCOA_15_20210513	0,90	0,76	0,88	0,70	0,85	0,61	0,82	0,52	0,78	0,42

Tabla 2. Imágenes Sentinel-2 seleccionadas

Ocupación del suelo (%)	*Imagen*	*Umbral*
0 < OS ≤ 10	GBCOA_9_20200403	0,40
10 < OS ≤ 30		
30 < OS ≤ 50		
50 < OS ≤ 80	GBCOA_6_20190429	0,40
OS > 80		

3.1.4. Factores de reducción para la superficie de tejados

Al área total de tejados se pueden aplicar diferentes factores de reducción para establecer la superficie donde instalar los paneles solares. Algunos estudios asignan los factores de forma general a todos los edificios (Izquierdo et al., 2008), también se definen según el tipo de edificios y la forma de los tejados (Ordoñez et al., 2010; Wiginton et al., 2010; Bergamasco y Asinari, 2011) o se detalla la ocupación de los tejados por otros elementos según sean residenciales, industriales o de servicios (Schallenberg-Rodríguez, 2013). Los factores empleados varían dependiendo de las características de entorno urbano y la información disponible para definirlos. Partiendo de los datos asignados a las manzanas, se definirán factores acordes a los tipos de edificios, su uso y las clases de cubiertas, que incluyan las siguientes restricciones:

- Restricción de cubiertas (RCU): Superficie ocupada por los edificios que no corresponde a los tejados, como por ejemplo los patios.
- Restricción de construcción (RC): Elementos que pueden localizarse en los tejados, así como la evaluación de su presencia en cada tipo de edificio (instalaciones de climatización, ascensores, ventanas, chimeneas, antenas, escaleras, depósitos de agua, etc.).
- Restricción de protección (RP): Edificios con alguna categoría de protección patrimonial, edificios históricos y monumentos.
- Restricción del estado de los tejados (RET): Representa a los edificios que pueden estar en ruina o con tejados dañados o en mal estado.
- Restricción de las sombras (RS) que engloba tres categorías: (a) El efecto de las sombras generadas por los elementos situados en los tejados, (b) la integración urbana relacionada con secciones de edificios o edificios cercanos, especialmente aquellos de gran altura, y (c) la presencia de árboles.
- Restricción por la forma de los tejados (RFT): Afectan al aprovechamiento de la radiación solar incidente. Está relacionada con la inclinación y orientación de los tejados.

3.2. Estimación de la radiación solar

En el análisis de la radiación solar se deben tener en cuenta factores que afectan a su distribución en el territorio. El relieve, las superficies afectadas por sombras, las condiciones atmosféricas y las diferencias estacionales son algunos de los principales factores. Para el cálculo de la radiación solar hemos empleado el procedimiento incluido en el modelo gSolarRoof que emplea la herramienta 'Radiación solar de áreas' integrada en el software ArcGIS, que permite representar la radiación en un periodo de tiempo definido para un área geográfica (Martín y Domínguez, 2019). El análisis realizado da como resultado la radiación solar global en cada ubicación de una superficie determinada. Como datos de entrada utilizamos el MDS de la JAXA que nos proporcionará la estimación de la radiación solar sobre el terreno con una resolución de 30 m (Figura 4). Este MDS ya se ha aplicado en otros estudios de radiación solar en Guanabacoa para establecer la máxima y mínima radiación potencial en unos días seleccionados del año (Cutié Rizo et al., 2021). Con el MDS se define la pendiente y orientación de las superficies que precisan el ángulo de incidencia de la radiación.

Una de las características del modelo de radiación es el cálculo de los parámetros relacionados con las condiciones atmosféricas para ajustar la radiación solar a las variaciones a lo largo del año. Los factores atmosféricos se definen a través de la proporción difusa (fracción de la radiación solar global) y la transmisibilidad (radiación solar que llega a la superficie al atravesar la atmósfera en relación a la radiación extraterrestre). En este estudio, se estiman los valores mensuales de los factores con datos de radiación solar horizontal en la localización de Guanabacoa obtenidos de PVGIS, tomando como referencia para el cálculo un día promedio para cada mes del año. Con el MDS y los factores atmosféricos se determina un mapa de radiación solar global de todos los meses del año con los que se calcula después el total anual.

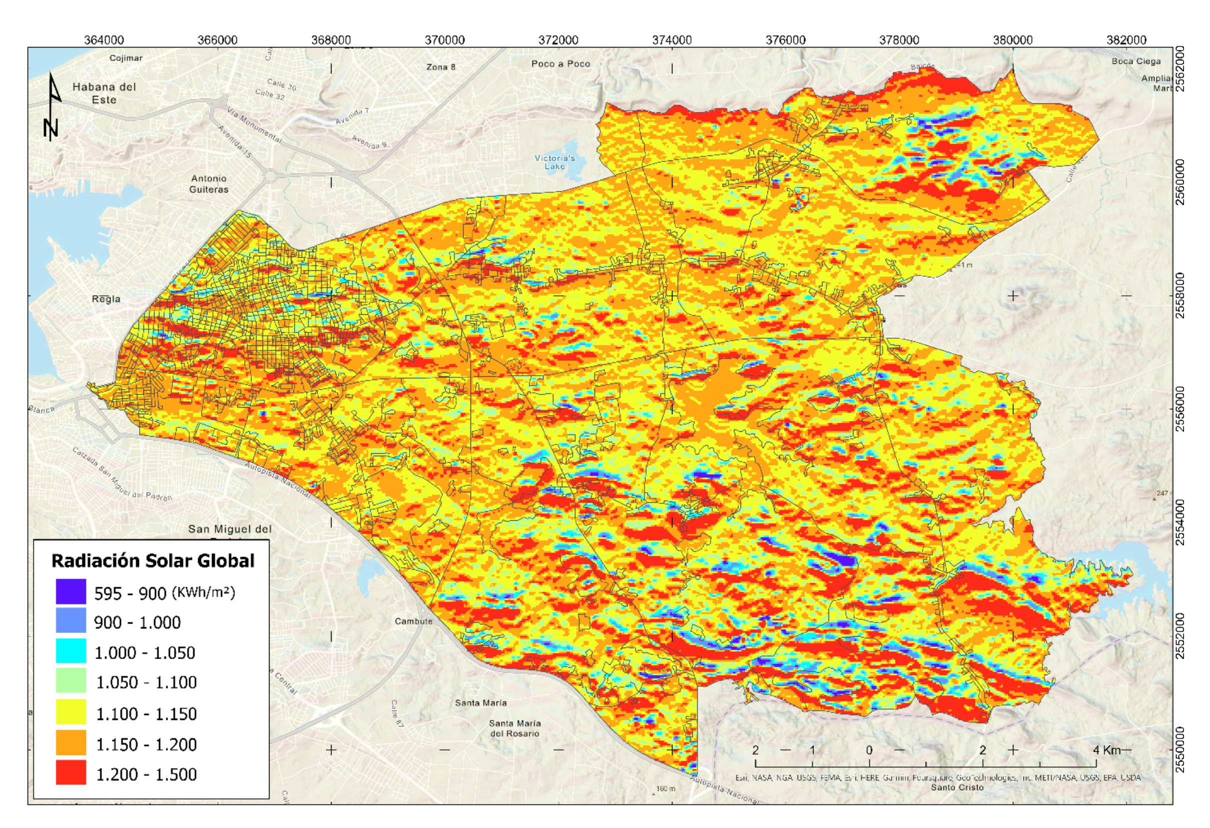


Figura 4. Mapa de radiación solar global anual del municipio de Guanabacoa.

4. RESULTADOS PRELIMINARES Y CONCLUSIÓN

Hasta el momento, los resultados obtenidos están relacionados con la caracterización de la estructura urbana de la zona del núcleo urbano de Guanabacoa. La zona analizada del municipio con un área de 1590 ha se ha dividido en 1096 unidades geográficas, formadas por manzanas o subdivisiones de las mismas, cuando ha sido necesario entre los usos urbanos (residencial, industrial y de servicios) o la clasificación de los edificios. En el 59,5 % del área se observa la presencia de algún tipo de edificación. La superficie con una ocupación baja o muy baja (0 > OS ≥ 30) apenas representa un 9,7 %. Las zonas más densamente construidas principalmente se concentran en las manzanas de una ocupación media (30 > OS ≥ 50), con el 18,9 %, seguidas por el 30,9 % de aquellas con una ocupación alta o muy alta.

En relación a los tipos de edificios y teniendo en cuenta la limitación de la información disponible sobre su uso, el 74,31 % del área corresponde a zonas residenciales, un 18,72 % a industriales y el 4,31 % está ocupado por los servicios. Destacar, en la distribución de los edificios y los tipos de tejados, que el 74,3 % de las manzanas se han asignado a la categoría de residencial heterogénea con tejados complejos. La forma de los tejados ha sido difícil de identificar adecuadamente debido a la resolución de la ortoimagen. Apenas en un 7 % se han observado tejados bien definidos como inclinados o planos.

La identificación del arbolado mediante la aplicación del índice de vegetación NDVI a las imágenes Sentinel-2, nos permitirá ajustar los factores de reducción para el sombreado en aquellas manzanas donde su presencia pueda afectar considerablemente a la radiación solar recibida por los tejados. Por ellos, se definirán intervalos de ocupación por el arbolado (OA), al igual que se utilizan para OS, para establecer si la presencia de los árboles es significativa. Existe la posibilidad de que parte del arbolado no se encuentre en buen estado o que su menor envergadura sea insuficiente para ser detectados con la resolución de 10 m de las imágenes Sentinel-2.

Después de estimar la superficie de tejados para las instalaciones solares con la aplicación de los factores de reducción definitivos a las manzanas, el siguiente paso será analizar el potencial para la producción de energía solar fotovoltaica y térmica de los tejados. Para una superficie determinada, en función de la radiación solar recibida, la potencia instalable y la energía eléctrica fotovoltaica anual se calculará con dos tecnologías de módulos fotovoltaicos de diferente eficiencia de los tipos silicio monocristalino y multicristalino (Defaix et al., 2012). Por otro lado, la producción de energía anual con colectores solares térmicos se realizará para varias temperaturas de referencia según el uso de los edificios. En general, el modelo gSolarRoof en zonas residenciales establece una temperatura de 60 °C para agua caliente sanitaria y en naves

industriales se consideran valores de 40 °C, 70 °C y 90 °C, para cubrir las diferentes necesidades de los procesos industriales (IDAE, ASIT, 2020). La energía térmica generada dependerá de la temperatura a alcanzar y el rendimiento de los colectores solares térmicos, considerando las tecnologías de tubo de vacío y planos.

Con el desarrollo de este proyecto se inicia la primera fase para dotar a toda La Habana del conocimiento necesario para desarrollar la energía solar como una alternativa que mejore la sostenibilidad y la calidad ambiental de la ciudad. Como podemos apreciar, la adaptación de modelos desarrollados con condiciones iniciales de alta disponibilidad de información geográfica no es sencilla. Una premisa fundamental será la accesibilidad de la información que se ha de utilizar. Desde esta perspectiva, el desarrollo de esta metodología específica para el proyecto Habana Ciudad Solar significa un análisis profundo de las fuentes disponibles y un intento por simplificar tareas que puedan ser continuadas por otros grupos de trabajo locales en un futuro próximo.

Nuestro compromiso con la ciudad establece tener un primer mapa solar de Guanabacoa cuya presentación coincidirá con la realización de nuestro congreso de Zaragoza. Esperamos que para entonces puedan visualizarse, a través de un geoportal en software libre, los resultados definitivos de la metodología que aquí hemos planteado.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto Habana Ciudad Solar ha sido financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional con la referencia 2018/PRYC/001742. Sodepaz es la coordinadora del proyecto contando como socios locales con Cubasolar y Cubaenergía entre otros. Nuestro agradecimiento a todos ellos por el apoyo incondicional en el desarrollo de este proyecto.

5. BIBLIOGRAFÍA

Abutaleb, K., Freddy Mudede, M., Nkongolo, N. y Newete, S.W. (2021). Estimating urban greenness index using remote sensing data: A case study of an affluent vs poor suburbs in the city of Johannesburg. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24 (3, Part 1), 343-351. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.07.002

Agencia Espacial Europea. (2021). *Copernicus Open Access Hub*. https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home

Agugiaro, G., Nex, F., Remondino, F., De Filippi, R., Droghetti, S. y Furlanello, C. (2012). Solar radiation estimation on building roofs and Web-Based solar cadastre. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,* I-2, 177-182. https://doi.org/10.5194/isprsannals-I-2-177-2012

Ariza-López, F. J., Rodríguez-Avi, J. y Alba-Fernández, V. (2018). Control estricto de matrices de confusión por medio de distribuciones multinominales. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 21, 215-226. https://doi.org/10.21138/GF.591

Bergamasco, L. y Asinari, P. (2011). Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Further improvements by ortho-image analysis and application to Turin (Italy). *Solar Energy*, 85, 11, 2741-2756. https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.010

Bramhe, V., Ghosh, S. y Garg, P. (2018). Extraction of built-up area by combining textural features and spectral indices from Landsat-8 multispectral image. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,* XLII-5, 727-733. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-727-2018

Byrne, J., Taminiau, J., Kurdgelashvili, L. y Kim, K.N. (2015). A review of the solar city concept and methods to assess rooftop solar electric potential, with an illustrative application to the city of Seoul. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 41, 830-844. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.023

Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas. (2020). *gSolarRoof*. https://gsolarroof.eu/

Comisión Europea. (2019). *EU Science Hub. PVGIS Photovoltaic Geographical Information System*. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-photovoltaic-geographical-information-system_es

Cutié Rizo, F., Hernández Mestre, D. y Armesto Fals, L. (2021). *Estimación de la radiación potencial global solar sobre la superficie del municipio Guanabacoa*. Cuba. Instituto de Geografía Tropical.

Defaix, P. R., Van Sark, W. G. J. H. M., Worrell, E. y De Visser, E. (2012). Technical potential for photovoltaics on buildings in the EU-27. *Solar Energy*, 86(9), 2644-2653. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.06.007

ESRI. (2021). *Living Atlas. Word Imagery*. https://livingatlas.arcgis.com/es/home/

Gergelova, M. B., Labant, S., Kuzevic, S., Kuzevicova, Z. y Pavolova, H. (2020). Identification of Roof Surfaces from LiDAR Cloud Points by GIS Tools: A Case Study of Lučenec, Slovakia. *Sustainability*, 12(17). https://doi.org/10.3390/su12176847

Guanabacoa. (28 de abril de 2021). En *EcuRed*. https://www.ecured.cu/Guanabacoa

Hashim, H., Abd Latif, Z. y Adnan, N. (2019). Urban Vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) Pleiades imagery. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W16, 237-240. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-237-2019

IDAE, ASIT. (2020). *Guía IDAE 022: Guía técnica de energía solar térmica*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía y Asociación Solar de la Industria Térmica. https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/guiasolartermica_idae-asit_v3.0_20210111_nipo.pdf

Instituto de Meteorología. (2022). *El clima de Cuba. Características generales*. Instituto de Meteorología de la República de Cuba. http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=CLIMAC&TB2=/clima/ClimaCuba.htm

Izquierdo, S., Rodrigues, M. y Fueyo, N. (2008). A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy,* 82, 10, 929-939. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.03.007

Japan Aerospace Exploration Agency. (2017). *ALOS Advanced Land Observing Satellite. ALOS Research and Application Project*. *ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D-30m" (AW3D30). https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm*

Li, Z. Q., Zhang, Z. D. y Davey, K. (2015). Estimating Geographical PV Potential Using LiDAR Data for Buildings in Downtown San Francisco. *Transactions in Gis*, 19(6), 930-963. https://doi.org/10.1111/tgis.12140

Lillesand, T.M., Chipman, J. W., Kiefer, R.W., Chipman, J.W. y Kieffer, R.W. (2007). *Remote sensing and image interpretation* (6th ed.). John Wiley & Sons.

Martín, A.M. y Domínguez, J. (2019). Solar Radiation Interpolation. En J. Polo, L. Martín-Pomares y A. Sanfilippo (Eds.), *Solar Resources Mapping: Fundamentals and Applications* (pp. 221-243). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97484-2_8

Martín Ávila, A. M., Domínguez Bravo, J. y Amador Guerra, J. (2016). Desarrollo de un modelo geográfico para la evaluación del potencial fotovoltaico en entornos urbanos. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, 18*, 147-167. https://dx.doi.org/10.21138/GF.483

Martín Ávila, A.M., Domínguez Bravo, J., Ferrer Tebar, J.A. y Díaz Herrero, G. (2021). *Study of the solar potential with the application of the gSolarRoof methodology in the industrial estates of Don Benito and Plasencia (Spain)*, (pp. 96). Madrid: CIEMAT.

Ministerio de Energía y Minas. (2021). *Energías Renovables y Eficiencia Energética*. https://www.minem.gob.cu/

Oficina Nacional de Estadística e Información. (2021). *Estudios y datos de la población. Cuba y sus territorios*. http://www.onei.gob.cu/publicaciones-tema/Poblacion

OpenStreetMap. (2018). *Download OpenStreetMap data for this region: Cuba*. https://download.geofabrik.de/central-america/cuba.html

Ordóñez, J., Jadraque, E., Alegre, J. y Martínez, E. (2010). Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia (Spain). *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 14, 7, 2122-2130. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.001

Rouibah, K. y Belabbas, M. (2020). Applying Multi-Index Appoach from Sentinel-2 Inagery to Extract Urban Areas in Dry Season (Semi-Arid Land in North East Algeria). *Revista de Teledetección*, 56, 89-101. https://doi.org/10.4995/raet.2020.13787

Schallenberg-Rodríguez, J. (2013). Photovoltaic techno-economical potential on roofs in regions and islands: The case of the Canary Islands. Methodological review and methodology proposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2, 219-239. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.078

Sun, Y.W., Hof, A., Wang, R., Liu, J., Lin, Y.J. y Yang, D.W. (2013). GIS-based approach for potential analysis of solar PV generation at the regional scale: A case study of Fujian Province. *Energy Policy,* 58, 248-259. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.03.002

Unión Europea. (2016). Mapping guide for a European Urban Atlas. Copernicus The European Earth Observation Programme. https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/urban-atlas-mapping-guide

Wiginton, L.K., Nguyen, H.T. y Pearce, J.M. (2010). Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. *Computers, Environment and Urban Systems,* 34(4), 345-357. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2010.01.001



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 505-513

Big Data y cambios demográficos en las distintas fases de la pandemia del COVID-19: estimación de la movilidad y población en España a partir de datos de telefonía móvil

J. Osorio Arjona[1], *J. de las Obras-Loscertales Sampériz*[2]

[1] *Departamento de Población, Centro de Ciencias Humanas y Sociales CSIC. C. Albasanz 26, 28037 Madrid.*
[2] *Departamento de Población, Centro de Ciencias Humanas y Sociales CSIC. C. Albasanz 26, 28037 Madrid.*

joaquin.osorio@cchs.csic.es, julia.des.samperiz@cchs.csic.es

RESUMEN: Este trabajo tiene como objetivo analizar y cartografiar los flujos de movilidad y los cambios en la población de España en diferentes escenarios comprendidos durante el periodo de la pandemia causada por el virus COVID-19. Para ello se ha buscado aprovechar la potencialidad con la que cuentan los registros de telefonía móvil como nuevas fuentes de datos basadas en Big Data para estudios de demografía y movilidad. A partir de datos de telefonía móvil proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística se han elaborado tanto matrices Origen-Destino como cálculos de estimación de población a nivel de celdas espaciales en días correspondientes a distintas fases de la pandemia. Los resultados muestran diferentes patrones de cambio de la población que se corresponden con los fenómenos que han ocurrido en la realidad, indicando que los registros de telefonía móvil son una fuente de datos útil para la elaboración de estudios de demografía y movilidad durante pandemias.

Palabras-clave: población estimada, Big Data, datos de telefonía móvil, matrices OD, COVID-19.

1. INTRODUCCIÓN

A Desde el año 2020, el planeta ha estado viviendo la mayor pandemia que se ha visto en los últimos 100 años. La pandemia ha cambiado radicalmente la vida diaria de las personas. A las pocas semanas de comenzar la pandemia, las discusiones sobre el uso de datos geolocalizados y las visualizaciones de los flujos de movilidad a nivel global se convirtieron en tema recurrente por los medios de comunicación y los organismos públicos y las empresas empezaron a utilizar datos geolocalizados para seguir la propagación de la enfermedad (Frith & Saker, 2020; Poom et al., 2020). En esta situación, estudiar las pautas de población y de movilidad se antoja de gran valor para poder ver que zonas son especialmente afectadas por el COVID-19 en distintos periodos de la pandemia, y poder tomar las medidas sanitarias oportunas. Sin embargo, trabajar con muestras grandes de datos de individuos infectados y no infectados suele conllevar un alto coste económico. Estos datos pueden tardar meses en ser procesados, y los resultados obtenidos difícilmente llegan a los ciudadanos, quienes normalmente son incapaces de seguir el trabajo de la comunidad sanitaria (Sousa et al., 2018). Además, las fuentes tradicionales para captar datos relacionados con enfermedades no recogen casos en los que las personas enfermas no pueden acudir a los centros de salud (Budd et al., 2020). Por tanto, es necesario disponer de datos con información espacial y temporal, que se puedan actualizar constantemente, rápidamente y a tiempo casi real.

En la actualidad, vivimos en una sociedad hiperconectada en la que el aumento del volumen y uso de los teléfonos móviles y la continua evolución tecnológica de estos dispositivos han conllevado un importante aumento en la cantidad y calidad de los datos obtenidos. A través de sus dispositivos móviles, los usuarios generan una huella digital de sus actividades y movimientos, una traza digital que puede ser seguida en el espacio y tiempo (Blanford et al., 2015). Estos datos permiten obtener información sobre la estructura dinámica de ciudades y regiones (Louail et al., 2014), ver los espacios más transitados (Lathia et al., 2013), o visualizar patrones de actividad urbana (Reades et al., 2009). Los datos geográficos que son creados por los dispositivos móviles, ya sea gracias a los registros de actividad del propio teléfono como por las aplicaciones instaladas en el teléfono, pueden ser adquiridos a veces a bajo coste. Posteriormente estos datos pueden ser

analizados en Sistemas de Información Geográfica (SIG), posibilitando la monitorización, cartografía y actualización constante de la información acerca de la movilidad en ciudades y regiones (Gutiérrez-Puebla et al., 2016).

Frente a metodologías clásicas basada en encuestas, las ventajas del Big Data geo-localizado son obtener grandes muestras de datos con un alto detalle espacial y temporal, en poco tiempo y a bajo coste (Gutiérrez Puebla, 2018; Osorio-Arjona & García-Palomares, 2019b; Poom et al., 2020) y monitorear a tiempo casi real la actividad de la población (Reddy et al., 2010). Los registros de actividad de telefonía móvil o *call data records* (CDR) son una de las fuentes de datos más utilizadas en proyectos de gran dimensión, debido al mayor tamaño de sus muestras y a una mayor resolución temporal de sus datos, con un registro producido en un intervalo de pocos segundos que permite el estudio de pautas de movilidad más complejas (Chen et al., 2016; Gutiérrez-Puebla et al., 2019; Kishore et al., 2018).

En estudios relacionados con la pandemia del COVID-19, los CDR se usan principalmente para revelar patrones y tendencias de demografía y movilidad en el espacio y el tiempo, para examinar el papel de la movilidad humana con la propagación del virus, y para realizar simulaciones y predicciones de la transmisión de la enfermedad (Hu et al., 2021). La combinación de los SIG y el Big Data juegan un papel importante en varios aspectos, como la agregación rápida de diferentes fuentes, la visualización y artografía de información epidemiológica, el seguimiento espacial de los casos confirmados, la predicción de la transmisión a nivel regional, y la segmentación espacial de los efectos de la epidemia para el diseño de políticas de prevención a niveles regionales (C. Zhou et al., 2020). En definitiva, los datos de telefonía móvil proveen de medios para estudiar la transmisión el virus, comprender los cambios diarios en la demografía y movilidad, y permiten visualizar procesos de recuperación (Poom et al., 2020). La utilidad de estos datos es constantemente demostrada, por lo que las operadoras de telefonía móvil son cada vez más receptivas a proveer acceso a este tipo de datos para el desarrollo de proyectos (Wesolowski et al., 2016).

Este trabajo busca por tanto utilizar los datos de telefonía móvil como fuente alternativa, rápida, y con un alto volumen de datos para analizar los patrones demográficos que ocurren en España durante distintas fases de la pandemia causada por el virus COVID-19, con el objetivo de visualizar tanto los flujos de movilidad como los cambios de población ocurridos en distintos lugares de España a partir del número de teléfonos móviles obtenidos de las principales compañías telefónicas del país. En comparación con otros trabajos de similar temática, este trabajo ofrece la cartografía de los resultados obtenidos durante cuatro momentos diferenciados que han ocurrido en un plazo de 15 meses, usando una escala espacial que permita la visualización de los patrones de movilidad y población de forma homogénea en distintas áreas del territorio, y la validación de los análisis realizados a partir de coeficientes de determinación y cartografía de residuos.

2. DATOS, ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

Para este trabajo se han utilizado los datos de telefonía móvil que ha recogido y puesto en disposición en su página web el Instituto Nacional de Estadística (INE) desde el 16 de marzo de 2020 hasta el 29 de diciembre de 2021. Estos datos provienen de las operadoras telefónicas *Movistar*, *Vodafone*, y *Orange*. Los datos de teléfonos de numeración extranjera que operan en *roaming* han sido excluidos. A partir del 23 de junio de 2020 solo se cuentan con registros publicados en miércoles y domingos. Se han utilizado particularmente las tablas de movilidad cotidiana. Cada registro cuenta con una fecha, un identificador de área o celda de origen, un identificador de celda de destino, y un número de teléfonos móviles. Estas tablas ya cuentan con un primer filtro en el que los flujos de viajes con menos de 15 personas detectadas han sido omitidos. Los datos de la página web del INE ya están separados por el día en el que se crearon, por lo que se ha trabajado directamente con las tablas de los cuatro días laborables seleccionados para la cartografía y comparación de los resultados obtenidos según distintas fases de la pandemia.

El área de estudio seleccionada para este trabajo es España. Este país es adecuado para estudios relacionados con los efectos del COVID-19 sobre la movilidad y la demografía debido a su pico pandémico grande y rápido y a la implementación de varias políticas de confinamiento y restricción de movilidad a lo largo del estado de alarma (Pérez-Arnal et al., 2021). Se ha trabajado a una escala espacial de 3214 celdas diseñadas por el INE. Estas celdas cuentan con población referente al 1 de enero del año 2020 y han sido diseñadas para que cuenten con una población homogénea que supere el umbral de 5000 habitantes empadronados y no supere un umbral de 50000 habitantes. De este modo, los municipios menores de 5000 habitantes son agrupados geográficamente para alcanzar el umbral mínimo de población. En cambio, los municipios de más de 50000 habitantes son desagregados en distritos o barrios que cumplan el umbral mínimo de población. De este modo también se palia la limitación con la que cuentan los registros de telefonía móvil de dependencia espacial de las antenas de telefonía. Como resultado, las ciudades de España están divididas en varias

celdas de movilidad (las grandes ciudades como Madrid y Barcelona cuentan con cientos de celdas), mientras que los municipios poco poblados del interior peninsular son agregados en una sola celda (Figura 1).



Figura 1. Celdas de movilidad de España diseñadas por el INE

El periodo temporal para esta investigación corresponde a cuatro días laborables (miércoles) que se corresponden cuatro periodos diferentes de la pandemia causada por el virus COVID-19 por los que ha pasado la población española:

- 15 de abril del año 2020: día perteneciente al periodo comprendido entre el 15 de marzo y el 21 de junio de 2020 en el que la población de España estaba bajo las medidas de cuarentena y confinamiento, entre las que se incluían la limitación de los desplazamientos y el cierre de comercios. Hay 3.578.378 registros publicados ese día.
- 19 de agosto del año 2020: día en el que se produce anualmente un considerable aumento de los flujos de movilidad a nivel de nacional por motivo vacacional o turístico. El confinamiento a nivel nacional ya se había terminado y se había entrado en una nueva etapa llamada *nueva normalidad*, en la que, aunque ya no había restricciones de movilidad, si seguía fomentándose medidas de prevención como el teletrabajo. Se han obtenido 38.163.485 registros telefónicos ese día.
- 16 de diciembre del año 2020: día próximo a las fechas navideñas y ubicado en el segundo estado de alarma, periodo que duró desde el 25 de octubre de 2020 hasta el 9 de mayo de 2021. En estas fechas se establecieron medidas de restricción de movilidad basadas en la prohibición de salir de la comunidad autónoma de residencia. Al contrario que el primer estado de alarma, las medidas de restricción de movilidad dentro de cada comunidad autónoma estuvieron bajo el control de las diferentes entidades autonómicas, provocando diferentes patrones de población y movilidad en el territorio español. Se cuenta con un total de 38.430.905 registros publicados.
- 9 de junio del año 2021: periodo posterior al segundo estado de alarma, ya sin restricciones de movilidad de nuevo. Estas fechas destacan por la campaña de vacunación contra el COVID-19 en España. A principios del mes de junio, la población mayor de 50 años ya ha tenido acceso a la vacuna, la cual estaba empezando a ser suministrada al resto de grupos de edad. Para ese día se cuentan con 39.819.645 registros de telefonía.

En cuanto a la metodología empleada, el primer paso ha sido incorporar en el SIG de escritorio *ArcGIS Pro* una capa con la geometría, información espacial y demográfica de las celdas suministradas por el INE. Entonces, se han calculado los centroides de las 3214 celdas de movilidad y diseñado una matriz Origen-Destino (con un total de 10.329.796 relaciones). A continuación, se elaboró un script en *Python* para procesar, limpiar, enriquecer y corregir los datos de las cuatro tablas de registros de telefonía móvil, eliminando los registros cuya celda de destino tiene un valor *OTRO* (otros destinos no correspondientes con las celdas de movilidad). Una vez procesadas las tablas de registros de telefonía móvil, se han incorporado al SIG y se han unido a la matriz Origen-Destino creada para poder cartografiar los flujos de movilidad tanto externos como internos de la población durante cada día de la muestra.

Para el cálculo de la población de cada celda espacial, se han resumido los registros de telefonía móvil de cada tabla tanto por celda de origen como por celda de destino. Se han obtenido como resultado por cada fecha una tabla con el número de teléfonos móviles que han salido de cada celda, y una tabla con el número de teléfonos móviles que han entrado a cada celda. Cada tabla cuenta con un total de 691.004 registros. A partir de estas dos tablas se ha creado una tabla de registros por celda en la que cada valor cuenta con el número de teléfonos móviles que entran y salen de la celda en el día de registro. Estas cuatro tablas se han unido a la capa de celdas para la posterior cartografía de sus valores.

A partir del número de móviles de pérdida y de ganancia se ha cartografiado el porcentaje de número de teléfonos móviles sobre el stock de población. Además, se ha procedido a calcular la población estimada de cada día a partir del stock de número de teléfonos móviles detectados y el saldo de población móvil en cada celda. Una vez calculado el número de teléfonos móviles con los que cuenta cada celda de movilidad, se ha estimado la población total a partir de la ponderación de la población de cada celda con un valor de factor de corrección que estima un porcentaje determinado de población a nivel de provincia que utiliza un teléfono de las tres compañías telefónicas en las que se sustentan los datos descargados del INE. El motivo por el que se ha realizado esta ponderación reside en la hipótesis de que el grueso de la población que utiliza datos de teléfono móviles se halla en una franja de edad entre 15 y 65 años, por lo que los datos de telefonía móvil del INE no cuentan con registros basados en población infantil o envejecida. De este modo, se busca paliar los problemas de sesgo con los que suelen contar los datos de telefonía móvil. Una vez ponderada la población en cada celda, se ha cartografiado el porcentaje de incremento de población sobre los datos de población del padrón de 2020.

3. RESULTADOS

Los primeros resultados permiten identificar los periodos de la pandemia afectados por cuarentenas y medidas de restricción de movilidad como las fechas con un menor número de teléfonos móviles registrados en los flujos de movilidad. Así, se puede observar un número reducido de viajes en abril del año 2020, destacando solo los viajes en las grandes áreas metropolitanas. En cambio, con el fin de la cuarentena y la llegada del periodo estival, se puede observar un aumento de los viajes en los archipiélagos, la costa del Mar Cantábrico y en las costas andaluzas.

Con el segundo estado de alarma en otoño de 2020 se ve de nuevo una reducción del número de viajes concentrándose otra vez en las grandes áreas metropolitanas españolas, pero al contrario que el periodo de cuarentena obligatoria del primer estado de alarma, se pueden apreciar un mayor número e intensidad de flujos. Finalmente, durante el periodo posterior al segundo estado de alarma, en junio de 2021, se visualiza una mayor cantidad de flujos entre celdas (destacando los valles del Guadalquivir y del Ebro, la costa atlántica gallega, y la Comunidad Valenciana) (Figura 2).

Si se visualizan los viajes internos o stock de teléfonos móviles (número de teléfonos móviles que se desplazaron dentro de las celdas de movilidad), durante los dos estados de alarma este número fue considerablemente menor, hallándose un número significativo de teléfonos móviles en desplazamiento principalmente en las grandes áreas metropolitanas de España. En cambio, durante las fechas sin restricciones (principalmente en el periodo posterior al primer estado de alarma), el número de teléfonos aumenta significativamente en otras zonas como el Valle del Guadalquivir, la costa gallega, o el interior peninsular (durante agosto de 2020) (Figura 3).

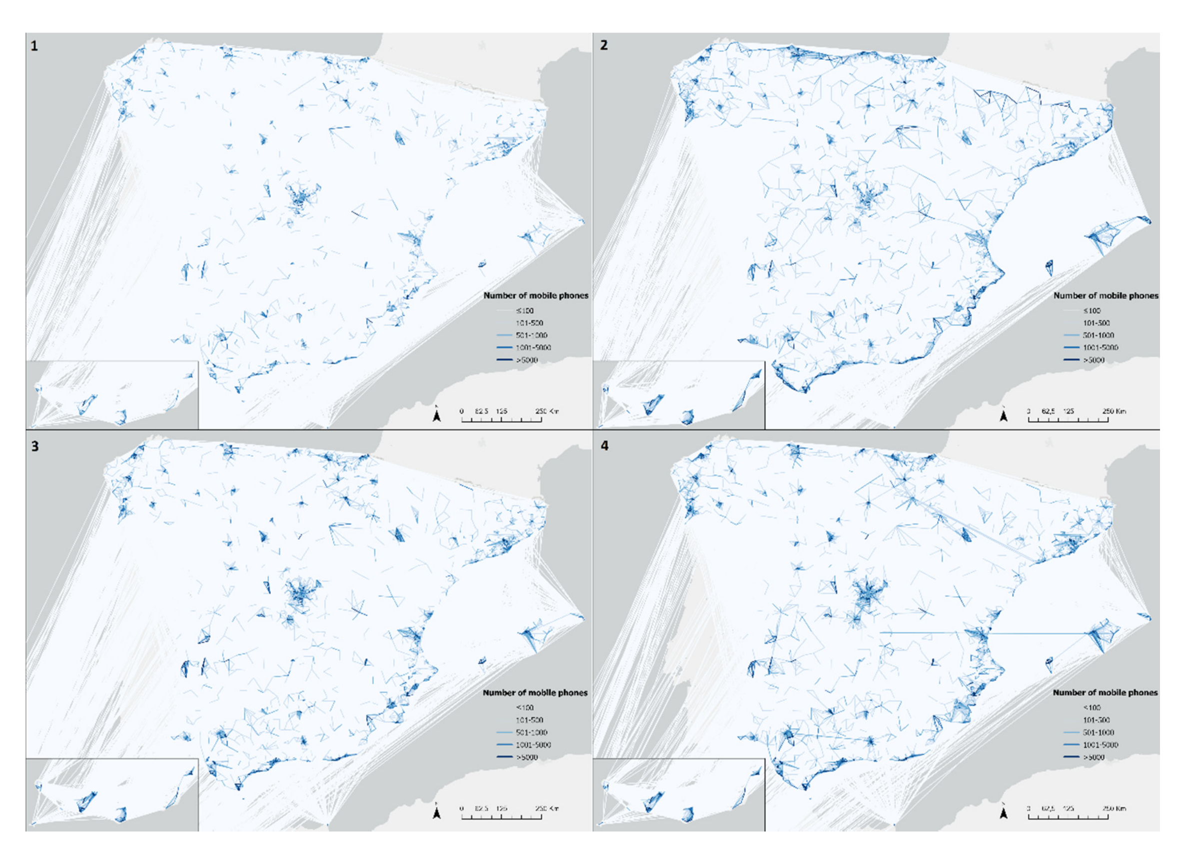


Figura 2. Número de teléfonos móviles que se han desplazado entre distintas celdas de movilidad en los días 15 de abril de 2020 (1), 19 de agosto de 2020 (2), 16 de diciembre de 2020 (3), y 9 de junio de 2021 (4)

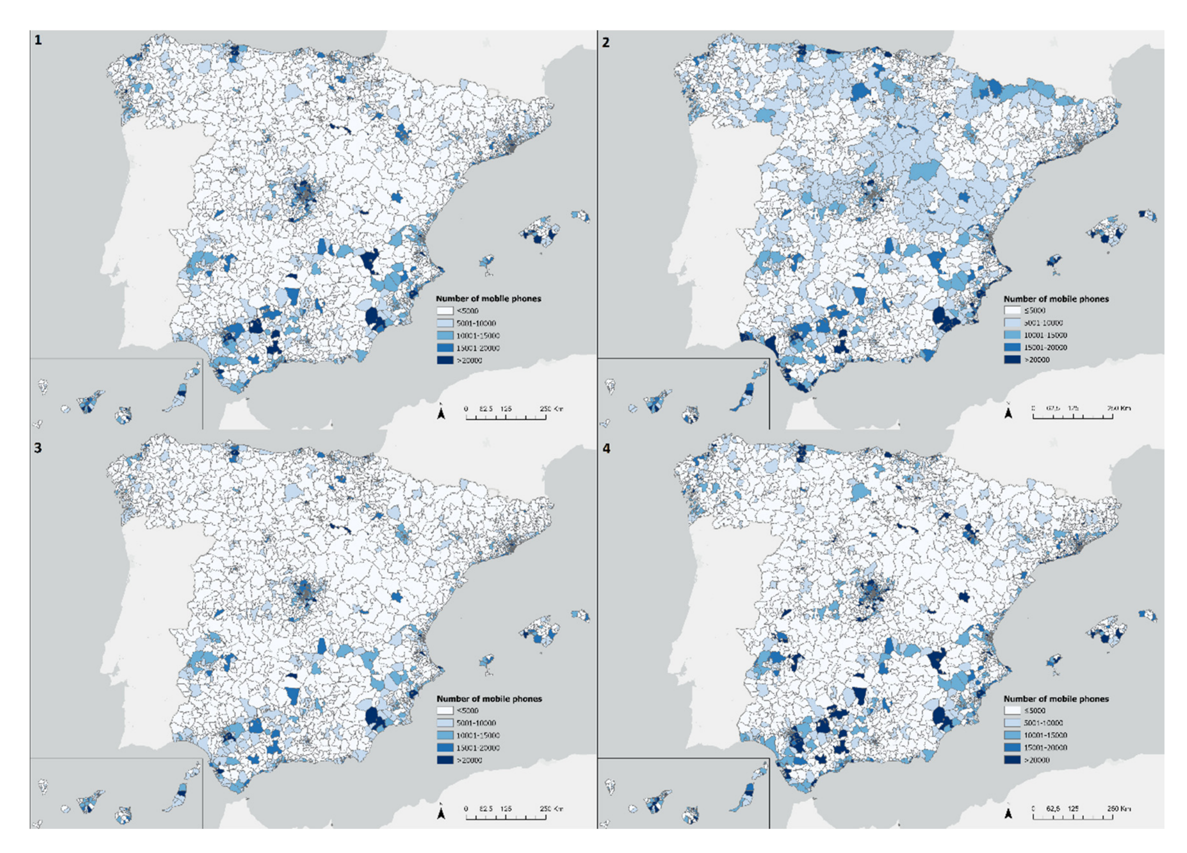


Figura 3. Stock de teléfonos móviles (desplazamientos internos en las celdas de movilidad) en los días 15 de abril de 2020 (1), 19 de agosto de 2020 (2), 16 de diciembre de 2020 (3), y 9 de junio de 2021 (4)

En cuanto a los cambios de población observados a partir del número de teléfonos móviles disponibles en cada celda, se observa cómo en el primer estado de alarma el porcentaje de saldo de teléfonos móviles es de forma general negativo o nulo en todo el país (con la excepción de los centros urbanos de las principales ciudades españolas), lo que indica un descenso generalizado de la movilidad en España. Durante el verano del año 2020 el porcentaje de saldo de teléfonos móviles es bastante negativo en zonas del interior peninsular y del interior de las regiones de Galicia, Cataluña y Andalucía. Mientras, se aprecia un aumento del porcentaje de teléfonos móviles en las islas Baleares, las zonas costeras del mar Cantábrico o en el área de los Pirineos. Se pueden considerar estas áreas como potenciales lugares turísticos a los que se desplazó la población durante las vacaciones de verano del año 2020.

En el segundo estado de alarma el porcentaje de teléfonos móviles tendió a ser nulo, concentrándose las celdas con un porcentaje negativo en los municipios de segunda residencia de las áreas metropolitanas del país y en el interior de las regiones de Galicia y Cataluña, mientras que las celdas asociadas a barrios de los centros metropolitanos (como Madrid o Barcelona) o a áreas industriales de País Vasco experimentaron porcentajes de número de teléfono móviles positivos, por lo que se puede hablar de una movilidad concentrada en viajes a centros de trabajo a las principales zonas empresariales e industriales durante esta fase de la pandemia. Con el final de las restricciones de movilidad, se reduce significativamente el número de celdas con porcentaje negativo de número de teléfonos móviles mientras que aumenta el número de celdas con porcentaje positivo, lo cual indica una recuperación y acercamiento de los comportamientos de movilidad en el país a la situación que había antes de la pandemia (Figura 4).

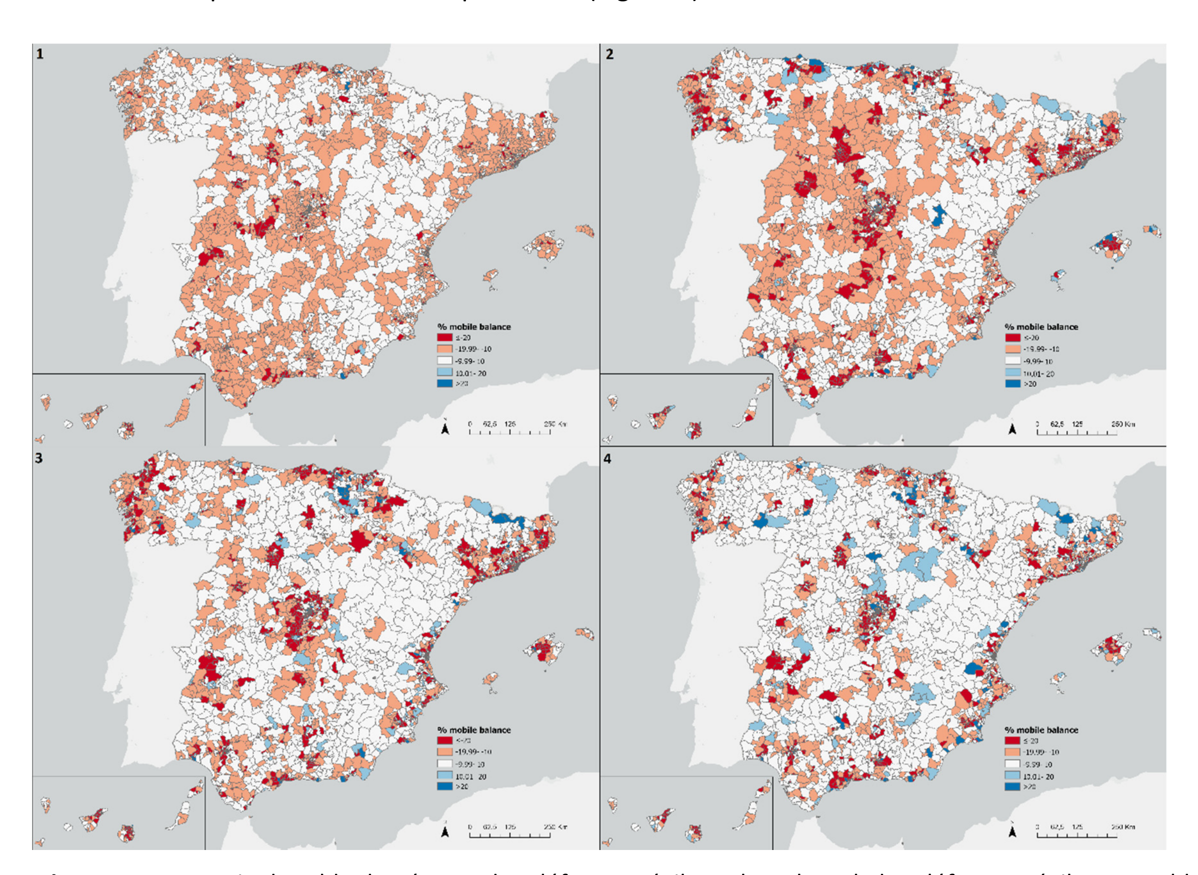


Figura 4. Porcentaje de saldo de número de teléfonos móviles sobre el stock de teléfonos móviles por celda en los días 15 de abril de 2020 (1), 19 de agosto de 2020 (2), 16 de diciembre de 2020 (3), y 9 de junio de 2021 (4)

Al comparar la población estimada a partir de datos de telefonía móvil con la población obtenida a partir de datos del INE, se ven porcentajes de cambio de población similares a los obtenidos en el Figura 4, pero con una mayor amplitud espacial. La diferencia radica en que el Figura 4 hace referencia al porcentaje de población detectada a partir de registros de teléfonos móviles, por lo que se desestiman franjas de población que no utilizan dichos dispositivos como la población infantil o envejecida. Mientras tanto, el porcentaje de población estimada sobre la población oficial en la Figura 5 tiene en cuenta estas franjas de población que no han empleado dispositivos móviles.

Destaca como el porcentaje de población estimada se ha reducido de forma generalizada en todo el

país durante el primer estado de alarma. Además, en los meses posteriores a esta primera fase este porcentaje ha sido significativamente negativo en la cordillera del Sistema Central. Estos resultados indican una reducción del número de habitantes generalizada en todo el país y concentrada en el interior peninsular, lo cual se puede asociar a la elevada mortalidad que sufrió España en esta primera fase de la pandemia. La reducción de la población se suaviza en todo el país durante el segundo estado de alarma, dándose en muchas celdas de interior una situación de crecimiento nulo. En el mes de agosto de 2021 los números de población en España se recuperan y aumenta el número de celdas con un incremento positivo del número de habitantes. En esta nueva fase, las celdas con un descenso de población se concentran en las áreas metropolitanas que envuelven las grandes ciudades españolas (ciudades dormitorio de las que la población se desplaza a trabajar a los núcleos urbanos) (Figura 5).

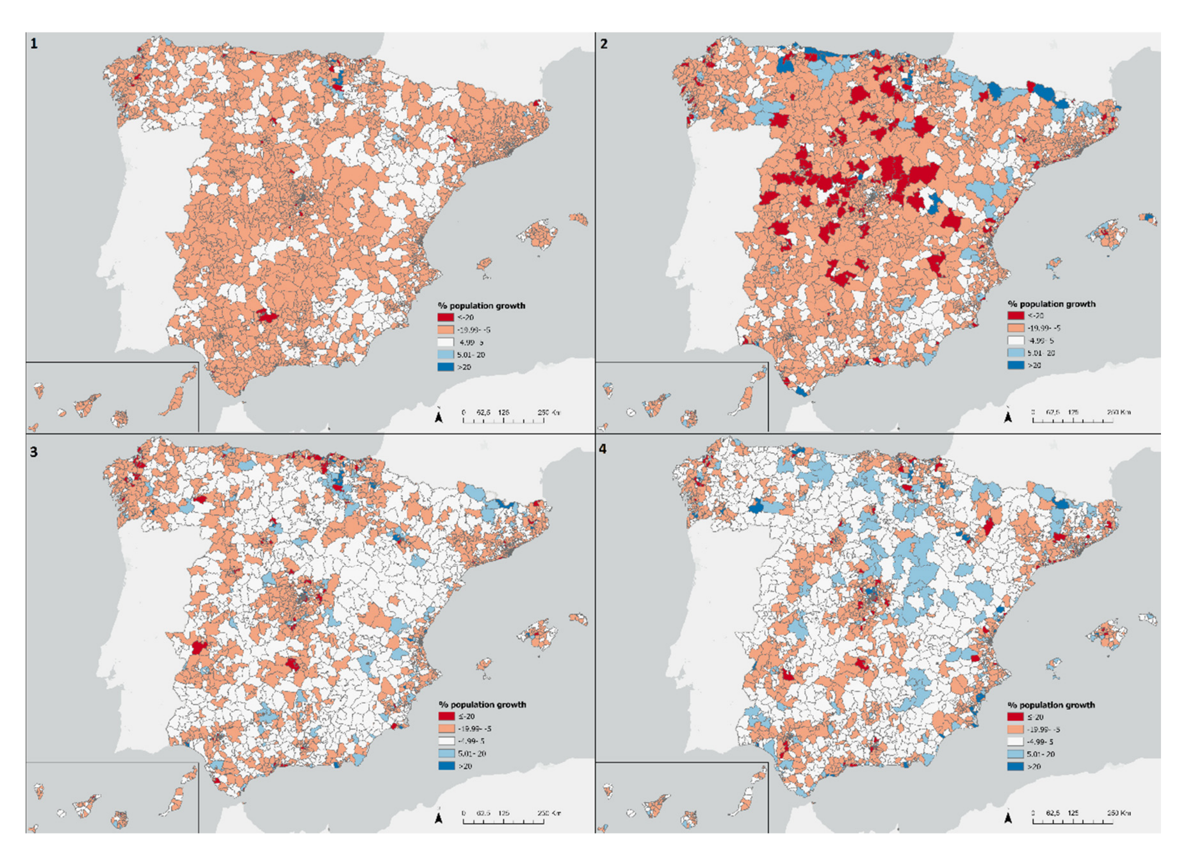


Figura 5. Porcentaje de población estimada sobre la población del INE por celda en los días 15 de abril de 2020 (1), 19 de agosto de 2020 (2), 16 de diciembre de 2020 (3), y 9 de junio de 2021 (4)

4. CONCLUSIONES

La pandemia causada por el virus COVID-19 ha afectado de forma significativa a los patrones demográficos de España, tanto en población como en movilidad. Se puede hablar de una crisis de carácter espacial (Poom et al., 2020). Es importante poder visualizar diferencias locales en la demografía y movilidad para estudiar la transmisión de este tipo de enfermedades infecciosas ya que hay que tener en cuenta que los patrones de contacto y el tamaño de la población varían en las diferentes regiones de un país (Budd et al., 2020). Para poder analizar las características especiales que ha tenido la demografía en España durante la pandemia es necesario disponer de un gran volumen de datos que puedan ser fácilmente actualizados y que permitan una monitorización de la población a gran detalle tanto espacial como temporal. Los registros de telefonía móvil son una herramienta que se antoja de gran valor a la obtención de estos datos, ya que ofrecen datos actualizados y permiten trabajar en distintas escalas espaciales y recoger información sobre periodos temporales concretos. Así es posible estudiar las diferentes pautas de población o movilidad en distintas escalas espaciales y temporales (Osorio-Arjona & García-Palomares, 2019a).

Hay que tener en cuenta que el uso de datos de telefonía móvil conlleva una serie de desventajas. La resolución espacial de estos datos no depende de la ubicación del teléfono del usuario, sino de las antenas de telefonía móvil que recogen las llamadas o el uso de la red 4G o 5G (Chen et al., 2016). En zonas donde hay una gran concentración de antenas como las grandes ciudades, la resolución espacial de los datos es

grande, pero, sin embargo, en zonas donde las antenas se localizan de forma dispersa como las áreas de interior (cuyos pueblos tienen pocos habitantes y están bastante separados), la ubicación de los teléfonos conlleva a errores considerables (Kishore et al., 2020). Para paliar este sesgo el INE ha ideado las celdas de movilidad que se han utilizado en este estudio. Otro problema de los datos de telefonía móvil consiste en que el elevado coste de estos datos hace prohibitivo la utilización de los mismos para estudios más pequeños o con poco presupuesto. Sin embargo, para promover el desarrollo de estudios poblacionales durante el periodo causado por la pandemia del COVID-19, el INE ha compartido estos datos en su plataforma web de forma gratuita. Hay que tener en cuenta también los problemas de privacidad que conlleva el uso de este tipo de fuentes de datos y la necesidad de agregar los registros individuales de telefonía móvil para tratar de mitigar estos problemas (Frith & Saker, 2020). Al anonimizar y agregar los datos de telefonía móvil, no solo no revelan información sobre individuos, sino que se obtienen estimaciones epidemiológicamente relevantes sobre la movilidad de la población (Kishore et al., 2020).

Los resultados obtenidos permiten visualizar los comportamientos demográficos de España en cuatro fases de la pandemia. Así, se ha podido observar un descenso generalizado de la movilidad y la población estimada durante el primer estado de alarma. En el periodo posterior definido como "nueva normalidad", la movilidad aumentó significativamente, especialmente a zonas del norte peninsular, mientras que la población ha continuado decreciendo, sobre todo en el interior peninsular. Durante el segundo estado de alarma, la población se mantuvo estable pero la movilidad se redujo de nuevo a raíz de las nuevas restricciones establecidas por las comunidades autónomas. Finalmente, en el periodo posterior al segundo estado de alarma (cuya principal característica es la propagación de vacunas contra el COVID-19), se puede apreciar un aumento tanto de los flujos de movilidad como de la población en las áreas metropolitanas del país. Los resultados obtenidos son similares con los fenómenos observados en la realidad durante las distintas fases de la pandemia en España. Además, el ajuste de la población del INE con los datos obtenidos a partir de datos de telefonía móvil ha presentado valores de coeficientes de determinación elevados, sobre todo durante las fases de estado de alarma de la pandemia. Por tanto, se puede extraer como conclusión que los datos de telefonía móvil son una fuente de datos válida y fiable para monitorizar y analizar los cambios continuos en los patrones de demografía y movilidad que ocurren durante las distintas fases de una crisis sanitaria.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el contexto del proyecto *Fair Computational Epidemiology* (FACE), asociado al proyecto PTI Salud Global del CSIC y fundado a partir de fondos *EUNextGeneration*.

5. BIBLIOGRAFÍA

Blanford, J. I., Huang, Z., Savelyev, A., & MacEachren, A. M. (2015). Geo-Located Tweets. Enhancing Mobility Maps and Capturing Cross-Border Movement. PLOS ONE, 10(6), e0129202. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129202

Budd, J., Miller, B. S., Manning, E. M., Lampos, V., Zhuang, M., Edelstein, M., Rees, G., Emery, V. C., Stevens, M. M., Keegan, N., Short, M. J., Pillay, D., Manley, E., Cox, I. J., Heymann, D., Johnson, A. M., & McKendry, R. A. (2020). Digital technologies in the public-health response to COVID-19. In Nature Medicine (Vol. 26, Issue 8). https://doi.org/10.1038/s41591-020-1011-4

Chen, C., Ma, J., Susilo, Y., Liu, Y., & Wang, M. (2016). The promises of big data and small data for travel behavior (aka human mobility) analysis. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 68, 285–299. https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.04.005

Frith, J., & Saker, M. (2020). It Is All About Location: Smartphones and Tracking the Spread of COVID-19. Social Media and Society, 6(3). https://doi.org/10.1177/2056305120948257

Gutiérrez Puebla, J. (2018). Big Data y nuevas geografías: la huella digital de las actividades humanas. Documents d'Anàlisi Geogràfica, 64(2), 195. https://doi.org/10.5565/rev/dag.526

Gutiérrez-Puebla, J., Benitez, C., Leaño, J. M., García-Palomares, J. C., Condeço-Melhorado, A., Mojica, C., Scholl, L., Adler, V., Vera, F., Moya-Gómez, B., & Romanillos, G. (2019). Cómo aplicar Big Data en la planificación del transporte urbano. El uso de datos de telefonía móvil en el análisis de la movilidad (C. Benitez, Ed.). Banco Interamericano de Desarrollo.

Gutiérrez-Puebla, J., García-Palomares, J. C., & Salas-Olmedo, M. H. (2016). Big (Geo) Data en Ciencias Sociales: Retos y Oportunidades. Revista de Estudios Andaluces, 33(331), 1–23. https://doi.org/10.12795/rea.2016.i33.0

Hu, T., Wang, S., She, B., Zhang, M., Huang, X., Cui, Y., Khuri, J., Hu, Y., Fu, X., Wang, X., Wang, P., Zhu, X., Bao, S., Guan, W., & Li, Z. (2021). Human mobility data in the COVID-19 pandemic: characteristics, applications, and challenges. International Journal of Digital Earth, 14(9). https://doi.org/10.1080/17538947.2021.1952324

Kishore, N., Kiang, M. v., Engø-Monsen, K., Vembar, N., Schroeder, A., Balsari, S., & Buckee, C. O. (2020). Measuring mobility to monitor travel and physical distancing interventions: a common framework for mobile phone data analysis. In The Lancet Digital Health (Vol. 2, Issue 11). https://doi.org/10.1016/S2589-7500(20)30193-X

Lathia, N., Smith, C., Froehlich, J., & Capra, L. (2013). Individuals among commuters: Building personalised transport information services from fare collection systems. Pervasive and Mobile Computing, 9(5), 643–664. https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2012.10.007

Lawal, O., & Nwegbu, C. (2020). Movement and risk perception: evidence from spatial analysis of mobile phone-based mobility during the COVID-19 lockdown, Nigeria. GeoJournal. https://doi.org/10.1007/s10708-020-10331-z

Louail, T., Lenormand, M., Cantú, O. G., Picornell, M., Herranz, R., Frias-Martinez, E., Ramasco, J. J., & Barthelemy, M. (2014). From mobile phone data to the spatial structure of cities. Scientific Reports, 4, 1–12. https://doi.org/10.1038/srep05276

Osorio-Arjona, J., & García-Palomares, J. C. (2019a). Social media and urban mobility: Using Twitter to calculate home-work travel matrices. Cities, 89, 268–280. https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.03.006

Osorio-Arjona, J., & García-Palomares, J. C. (2019b). Big Data y universidades: análisis de movilidad de los estudiantes universitarios a partir de datos de Twitter. GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica, 24(9), 37–57. https://doi.org/10.21138/GF.648

Pérez-Arnal, R., Conesa, D., Alvarez-Napagao, S., Suzumura, T., Català, M., Alvarez-Lacalle, E., & Garcia-Gasulla, D. (2021). Comparative analysis of geolocation information through mobile-devices under different COVID-19 mobility restriction patterns in Spain. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(2). https://doi.org/10.3390/ijgi10020073

Poom, A., Järv, O., Zook, M., & Toivonen, T. (2020). COVID-19 is spatial: Ensuring that mobile Big Data is used for social good. In Big Data and Society (Vol. 7, Issue 2). https://doi.org/10.1177/2053951720952088

Reades, J., Calabrese, F., & Ratti, C. (2009). Eigenplaces: analysing cities using the space – time structure of the mobile phone network. Environment and Planning B: Planning and Design, 36(5), 824–836. https://doi.org/10.1068/b34133t

Reddy, S., Mun, M., Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., & Srivastava, M. (2010). Using mobile phones to determine transportation modes. ACM Transactions on Sensor Networks, 6(2), 1–27. https://doi.org/10.1145/1689239.1689243

Sousa, L., de Mello, R., Cedrim, D., Garcia, A., Missier, P., Uchôa, A., Oliveira, A., & Romanovsky, A. (2018). VazaDengue: An information system for preventing and combating mosquito-borne diseases with social networks. Information Systems, 75, 26–42. https://doi.org/10.1016/j.is.2018.02.003

Wesolowski, A., Buckee, C. O., Engø-Monsen, K., & Metcalf, C. J. E. (2016). Connecting mobility to infectious diseases: The promise and limits of mobile phone data. Journal of Infectious Diseases, 214. https://doi.org/10.1093/infdis/jiw273

Zhou, C., Su, F., Pei, T., Zhang, A., Du, Y., & Luo, B. (2020). Geography and Sustainability COVID-19 : Challenges to GIS with Big Data. Geography and Sustainability, 1(1).



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 514-523

Determinación temprana mediante teledetección del inicio de la etapa de desarrollo para el maíz de segunda cosecha en la Zona Regable de La Violada (Huesca)

E. Pérez-Cardiel[1], J. de la Riva[1], M. Rodrigues [1], MA. Casterad[2]

[1] Grupo GEOFOREST-IUCA, Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España.
[2] Dpto. de Sistemas Agrícolas, Forestales y Medio Ambiente, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón, Avda. Montañana 930, 50059 Zaragoza, España.

epcardiel@unizar.es, delariva@unizar.es, rmarcos@unizar.es, acasterad@cita-aragon.es

RESUMEN: La teledetección satelital proporciona observaciones frecuentes de las propiedades de la superficie terrestre que permiten caracterizar parámetros fenológicos a partir de la evolución temporal de índices de vegetación, utilizando generalmente series completas del ciclo del cultivo. En el contexto de la digitalización en la agricultura, resulta fundamental la identificación temprana de la fenología, sin necesidad de utilizar la serie de datos del ciclo completo de los cultivos. Por ello, el objetivo de este trabajo es determinar de forma temprana el inicio de la etapa de desarrollo del maíz de segunda cosecha a partir de series temporales de imágenes multiespectrales. La metodología utilizada para determinar el inicio de la etapa de desarrollo se basará en una técnica de detección de punto de cambio en la serie temporal. Las imágenes satelitales tienen el inconveniente de la cobertura de nubes en algunos momentos del ciclo del cultivo que hace que existan vacíos en las series temporales. Por ello, se analizará también la falta de datos (cubrimiento por nubes) y la incorporación de datos de Sequoia a la serie temporal Sentinel 2. Los resultados indican que se puede determinar el inicio de la etapa de desarrollo utilizando la técnica de punto de cambio –prueba de Pettitt– aplicada a series temporales de IV obtenidos con Sentinel 2, la falta de datos en los momentos cercanos del inicio de la etapa de desarrollo puede adelantar su determinación, no en cambio si la falta de datos se produce al inicio del ciclo del cultivo. Además, las series temporales de IV de Sequoia en UAV y de MSI de Sentinel 2 pueden integrarse y usarse de manera efectiva para detectar el IED, siendo el índice NDRre es más adecuado.

Palabras-clave: fenología, UAV, prueba de Pettitt, serie temporal.

1. INTRODUCCIÓN

En el marco actual de la digitalización en agricultura y la aplicación operativa de las TIG, se abren nuevas posibilidades de aplicación como la identificación temprana de la presencia y el desarrollo de los cultivos. El inicio de la etapa de desarrollo (IED), término adoptado por la FAO 56, comienza cuando el cultivo cubre aproximadamente un 10% del suelo. La fecha de siembra es una entrada fundamental para los modelos de desarrollo de cultivos y los modelos de determinación de sus necesidades hídricas (Bandaru et al., 2020). Pero no siempre se conoce esta fecha, optándose por su determinación a partir del momento del IED (Liu et al., 2018). El IED de los cultivos está determinado tanto por factores ambientales como por las operaciones de manejo de cada agricultor; a veces si se produce una fase prolongada de sequía o una fase de periodos húmedos, los agricultores pueden variar el momento de la siembra.

La teledetección satelital proporciona observaciones periódicas de la superficie terrestre que pueden utilizarse para caracterizar la fenología de los cultivos. Generalmente esta caracterización se realiza a partir de series temporales de imágenes, cuya frecuencia de adquisición varía en función de la plataforma. Actualmente existen satélites como Sentinel 2, con alta resolución temporal y resolución espacial adecuada, que pueden ofrecer esta información. No obstante, al tratarse de un sensor espectral, la frecuente cobertura de nubes en algunos momentos del ciclo del cultivo sigue siendo el principal inconveniente para tener datos con la frecuencia necesaria. Para evitar estas situaciones y completar la serie de datos se pueden incluir imágenes adquiridas con plataformas no tripuladas (UAV). En Pérez-Cardiel (2022) se constata que la combinación de

IV derivados de MSI de Sentinel 2 y de cámara Sequoia (portada en UAV) ofrece medidas consistentes, por lo que la combinación de los datos MSI de Sentinel 2 y Sequoia en series temporales puede ser una buena alternativa para determinar de forma más ajustada la fecha de IED.

Por todo lo anterior, el objetivo de este estudio es determinar de forma temprana el inicio de la etapa de desarrollo de los cultivos de regadío a partir de series temporales de imágenes multiespectrales para segundas cosechas de maíz. Para ello se va a desarrollar y validar una metodología para detección temprana de IED utilizando la serie temporal de Sentinel 2, analizando la falta de datos (cubrimiento por nubes) y la incorporación de datos de Sequoia a la serie temporal Sentinel 2. La metodología de detección de IED se basará en una técnica de detección de punto de cambio.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La secuencia de trabajo seguida para el desarrollo de este estudio consta de tres fases: 1) obtención del día juliano con el 10% de FCV de las parcelas mediante fotográficas RGB cenitales; 2) determinación del IED en las series de IV por medio de la técnica de detección de punto de cambio; 3) incorporación de imágenes obtenidas por medio de UAV en la serie temporal de datos y su efecto en la determinación de IED.

2.1. Área de estudio

Para este estudio se utilizaron varias parcelas de la Zona Regable de La Violada (ZRV, Huesca) 3 cultivadas en 2018 y 3 en 2019. Corresponden a parcelas con maíz de segunda cosecha sembradas sin laboreo, es decir, mediante siembra directa después de cosechar la cebada. La siembra se realizó a finales de junio, produciéndose la emergencia del cultivo, como promedio, aproximadamente una semana después de la siembra.

2.2. Selección de la ventana óptima para la detección del IED

Tras revisar varios estudios llevados a cabo en la ZRV por parte del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (Malik y Dechmi, 2019), el periodo óptimo para la detección del IED en maíz de doble cosecha mediante series de imágenes multitemporales se sitúa entre la primera y la segunda semana de julio, concretamente entre los días julianos 186 y 192. La técnica de detección del punto de cambio requiere datos durante las primeras etapas de crecimiento, periodo que se muestra en la Figura 1, que abarca desde la siembra hasta V4-V5 para maíz.

Los periodos de cada año en los que se realizaron las salidas de campo (toma de fotografía RGB) abarcan desde la emergencia del cultivo (estadio V1) hasta cuando el tallo comienza el periodo de gran elongación (estadio V6) (Ritchie et al., 1986). Las fechas concretas de captura se pueden consultar en la Tabla 1.

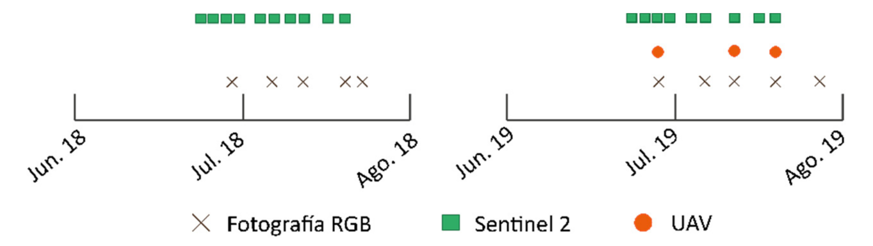


Figura 1. Momentos de realización de las fotografías RGB en campo, obtención de datos de Sentinel 2 y de UAV.

Tabla 1. Fechas de adquisición de fotografías con cámara RGB en cada una de las parcelas en 2018 y 2019

Año	Parcela	28/06/2019	05/07/2019	10/07/2019	15/07/2019	23/07/2019
2018	A	X	X	X	X	X
	B			X	X	X
	C		X	X	X	X

Año	Parcela	28/06/2019	05/07/2019	10/07/2019	18/07/2019	25/07/2019
2019	D		X	X	X	
	E	X	X	X	X	X
	C’	X	X		X	X

2.3. Adquisición y procesamiento de fotografías RGB

Las fotografías se tomaron en 10 jornadas de campo distribuidas en a lo largo del periodo inicial de desarrollo del cultivo, desde finales de junio hasta final de julio, en los dos años de estudio (Tabla 1). En cada parcela se seleccionaron 3 zonas donde se identificó visualmente en el campo que el cultivo era representativo del conjunto de la parcela. Con una cámara Huawei WAS-LX1A se tomó una fotografía RGB sobre una superficie delimitada por un aro de 73 cm de diámetro (correspondiente con la distancia entre filas de cultivo) colocado en las zonas elegidas. La cámara estaba a unos 120 cm del suelo, para asegurar recoger toda la superficie abarcada por el aro, en un plano cenital y enfocando el centro de cada circunferencia. Tanto la velocidad de obturación como la apertura se dejaron automáticas y las imágenes se tomaron sin flash. El tamaño de la imagen fue de 3968×2240 píxeles y se guardaron en formato JPEG.

Se realizó un recorte de las imágenes ajustado a la circunferencia definida por el aro y posteriormente se analizaron las imágenes resultantes con el software de acceso libre BreedPix 0.2 (Casadesús et al., 2005). Este software clasifica los pixeles de la imagen según su tono (Hue, en representación de la imagen HSI) y cuantifica la proporción de píxeles de la imagen que son verdes (GA, *Green Area*) y muy verdes (GGA, *Greener Area*). El GA indica el porcentaje de píxeles de la imagen cuyo tono está entre 60º y 120º de la totalidad, mientras que el GGA muestra el porcentaje de píxeles con tono entre 80º y 120º (Casadesús y Villegas, 2014; Casadesús et al., 2005). La FCV de cada parcela se estimó como el promedio de las tres medidas de GA realizadas en cada parcela, ya que en los primeros estadios del cultivo la GA está estrechamente relacionada con la cobertura del suelo. El resultado del tratamiento de la imagen con BreedPix se puede ver en la Figura 2.

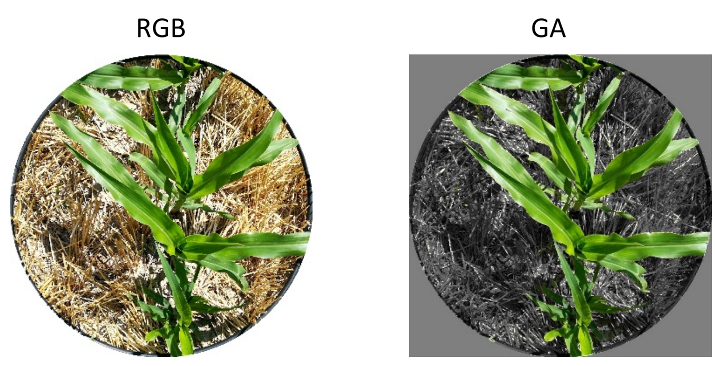


Figura 2. Estimación de la FCV: imagen utilizada (RGB) recortada e imagen de área verde (GA) tratada con BreedPix.

2.4. Recopilación y procesamiento de los datos de detección remota

2.4.1. Imágenes multiespectrales

Se utilizan imágenes de tres vuelos adquiridas con UAV e imágenes Sentinel 2, 10 del año 2018 y 9 del 2019. De los tres vuelos con UAV, el primero se realizó coincidiendo aproximadamente con el día de siembra, el segundo con el momento del IED y el tercero una semana después del IED. Las imágenes se obtuvieron con un UAV de ala fija *SenseFly eBee Classic* al que se le había instalado el sensor Sequoia. La planificación y el control del vuelo se llevaron a cabo con el software *eMotion*. Los vuelos se realizaron en condiciones atmosféricas óptimas, días con viento menor de 8 m/s y sin demasiadas nubes visibles. En todo caso, el UAV dispone de un sensor de iluminación "*Sunshine*" que permite calibrar los valores adquiridos. La captura se realizó al mediodía solar, cuando el ángulo solar es más alto, minimizando así las sombras de la vegetación. La altitud del vuelo fue de 100 m aproximadamente, lo que permite obtener una resolución espacial de 8 cm. Las imágenes se adquirieron con un 80% de superposición, tanto lateral como longitudinal. Para la calibración radiométrica se utilizó el objetivo de calibración del sensor Sequoia y para la georreferenciación de la imagen se pusieron entre 4 y 8 puntos de control, según la dimensión de cada parcela. Los datos extraídos de las imágenes fueron procesados con el software Pix4Dmapper. Las imágenes Sentinel 2 se obtuvieron de los dos satélites, A y B, de la misión Copernicus. El producto que se utilizó fue el nivel 2A que proporciona imágenes de reflectancia corregidas atmosféricamente, es decir, en las que se excluyen los efectos de la atmósfera sobre la luz reflejada por la superficie de la Tierra que llega al sensor. Las imágenes se descargaron del Copernicus Open Access Hub de la Agencia Espacial Europea (ESA).

La ZRV y, por tanto, las parcelas de estudio se encuentran en un área de superposición de dos franjas adyacentes de paso del satélite Sentinel 2, lo que permite disponer de mayor frecuencia de imágenes. Durante la temporada de crecimiento de 2018 se adquirieron imágenes cada 2 y 3 días en el mejor de los casos

y cada 5 en el peor. Sin embargo, en la temporada de 2019 hay más situaciones con imagen cada 5 días, cuya repercusión en la detección del IED será objeto de análisis.

2.4.2. Índices de vegetación

Los IV seleccionados para la determinación del IED fueron el NDRre, NDVI y OSAVI. Estos índices, además de estar entre los más utilizados en la literatura, sobre todo NDVI y OSAVI, han sido los que mejor relación mostraron entre los sensores MSI de Sentinel 2 y Sequoia (Pérez-Cardiel, 2022). En la Tabla 2 se muestra el rango espectral utilizado de cada sensor para que en la formulación de los IV (Tabla 3) sean coincidentes los rangos espectrales de Sequoia y MSI de Sentinel 2.

Tabla 2. Rangos espectrales utilizados de cada sensor

RANGO ESPECTRAL	*SEQUOIA*	*MSI DE SENTINEL 2*
Reflectividad del rojo (R_{ROJO})	banda roja	banda 4
Reflectividad del borde del rojo (R_{BR})	banda del borde del rojo	banda 6
Reflectividad del infrarrojo cercano (R_{IC})	banda del infrarrojo cercano	banda 7

Tabla 3. NDRre, NDVI y OSAVI derivados de las imágenes de Sequoia y MSI de Sentinel 2

ÍNDICE VEGETACIÓN	*FÓRMULA*	*REFERENCIA*
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada del Rojo-Borde del rojo (NDRre)	$NDRre = (R_{BR} - R_{ROJO})/\ (R_{BR} + R_{ROJO}$	Gitelson et al. (2002)
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	$NDVI = (R_{IC} - R_{ROJO})/\ (R_{IC} + R_{ROJO}\ )$	Rouse et al. (1974)
Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Optimizado (OSAVI)	$OSAVI = (1 + 0{,}16)(R_{IC} - R_{ROJO}\ )/\ (R_{IC} + R_{ROJO} + 0{,}16)$	Rondeaux et al. (1996)

2.5. Determinación del Inicio de la Etapa de Desarrollo (IED)

2.5.1. IED a partir de fotografías RGB y la fracción de cobertura vegetal

Con los datos de FCV obtenidos en los muestreos de campo se realizó un primer análisis exploratorio mediante gráficos de dispersión, lo que permitió determinar la relación entre la FCV y los días julianos. Se utilizaron técnicas de regresión lineal para analizar la relación existente entre la escala temporal y la FCV. Para valorar la exactitud de la precisión del modelo se utilizaron el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE). El 10% de la FCV será el IED de referencia (Fase 1) con el que evaluará el IED obtenido aplicando la prueba de Pettitt (Fase 2). Para su cálculo se aplicaron las ecuaciones resultantes de la regresión lineal entre FCV y los días julianos.

2.5.2. IED a partir de imágenes Sentinel 2 y la técnica de detección del punto de cambio

La técnica de detección de puntos de cambio tiene como objetivo identificar los momentos en los que cambia la distribución de probabilidad de una serie temporal. Para detectar el IED se aplicó la técnica de punto de cambio de Pettitt. En el contexto de la detección de las etapas fenológicas del ciclo anual de cultivos agrícolas, estas pruebas no han sido previamente utilizadas; aunque son pruebas ampliamente utilizadas para el análisis de series hidrológicas y climáticas. La prueba de Pettitt es un método no paramétrico que se aplica habitualmente para detectar un único punto de cambio con datos continuos (Pettitt, 1979) y permite comprobar si hay un cambio en la tendencia central de una serie temporal. Pone a prueba la hipótesis nula, "ningún cambio", frente a la alternativa "existe un punto de cambio". El estadístico no paramétrico en el que se basa la prueba (Ryberg et al., 2020; Verstraeten et al., 2006) se define como (Ecuaciones 1 y 2):

$$\widehat{U} = \max|U_k\ | \qquad (1)$$

donde

$$U_k = (2\sum_{i=1}^{k} r_i) - k\ (n+1) \qquad k = 1,2,3, \dots \dots, n \qquad (2)$$

donde $r_i$es la clasificación (ranking) en la serie temporal, n es la longitud de la serie temporal.

El punto de cambio probable $\widehat{U}$ se encuentra ubicado donde U_k tiene su máximo valor absoluto, siempre que el estadístico sea significativo y la probabilidad de significación de $\widehat{U}$ p ≤ 0,05. Esta probabilidad se calcula según la Ecuación 3:

$$p = 2\exp((-6\hat{U}^2)/(n^3 + n^2)) \quad (3)$$

En raras ocasiones la prueba de Pettitt devuelve dos puntos de cambio debido a empates en los datos; en estos casos se optó por el primer punto de cambio, de acuerdo con Ryberg et al. (2020).

El test se aplicó a la serie temporal de IV, que se formó con todas las parcelas para cada cultivo a partir de los datos promedio de cada parcela y fecha. Los datos se ordenaron consecutivamente teniendo en cuenta el día de la siembra, dando lugar a una serie temporal a la que se le aplicaron las técnicas de detección de punto de cambio. Previamente a la aplicación de las técnicas de detección de cambio, con el objetivo de eliminar ruido y suavizar los datos de la serie, se aplicó el filtro Savitzky y Golay (1964). Los parámetros utilizados en el filtro Savitzky-Golay (SG) fueron un polinomio de orden 3 y la longitud del filtro de 5 (es un filtro poco marcado, ya que en una exploración inicial se observó que los datos no presentaban grandes picos).

2.5.3. IED a partir de imágenes Sentinel 2 y la prueba de Pettitt simulando datos perdidos.

Se simularon datos perdidos en la serie temporal (falta de imágenes) que podrían haberse generado de forma natural por nubosidad u otras causas. La eliminación de las imágenes no se realizó de forma aleatoria, sino que se eliminaron de forma correlativa una, dos y hasta tres imágenes seguidas durante el periodo establecido en el que se puede producir el IED. Los resultados se evaluaron con el mismo procedimiento que en los apartados anteriores, observando las diferencias con el IED-referencia.

2.5.4. IED a partir de la combinación de imágenes Sentinel 2 y UAV aplicando la prueba de Pettitt

Se comprobó también cómo se vería afectada la predicción de IED cuando se combinan datos de Sentinel 2 y UAV. Para ello, las tres imágenes de Sequoia obtenidas mediante UAV sustituyeron en la serie temporal a las imágenes Sentinel 2 de ese mismo día. La incorporación de imágenes de UAV en la serie de datos de Sentinel 2 da lugar a varios escenarios a analizar, tal y como se puede ver en la Tabla 4. Para evaluar los resultados con la incorporación de las imágenes de Sequoia se realizó el mismo procedimiento anterior, eliminando fechas y comparando los resultados con el IED-Referencia.

Tabla 4. Rangos espectrales utilizados de cada sensor

ESCENARIO	*DENOMINACIÓN*	*IMÁGENES*
Escenario 1	E1 S2	Solo imágenes de S2
Escenario 2	E2 S2 + Sequoia (179)	Serie S2 con Sequoia 179
Escenario 3	E3 S2 + Sequoia (191)	Serie S2 con Sequoia 191
Escenario 4	E4 S2 + Sequoia (199)	Serie S2 con Sequoia 199
Escenario 5	E5 S2 + Sequoia (179+191)	Serie S2 con Sequoia 179 y 191
Escenario 6	E6 S2 + Sequoia (179+199)	Serie S2 con Sequoia 179 y 199
Escenario 7	E7 S2 + Sequoia (191+199)	Serie S2 con Sequoia 191 y 199
Escenario 8	E8 S2 + Sequoia (179+191+199)	Serie S2 con Sequoia 179, 191 y 199

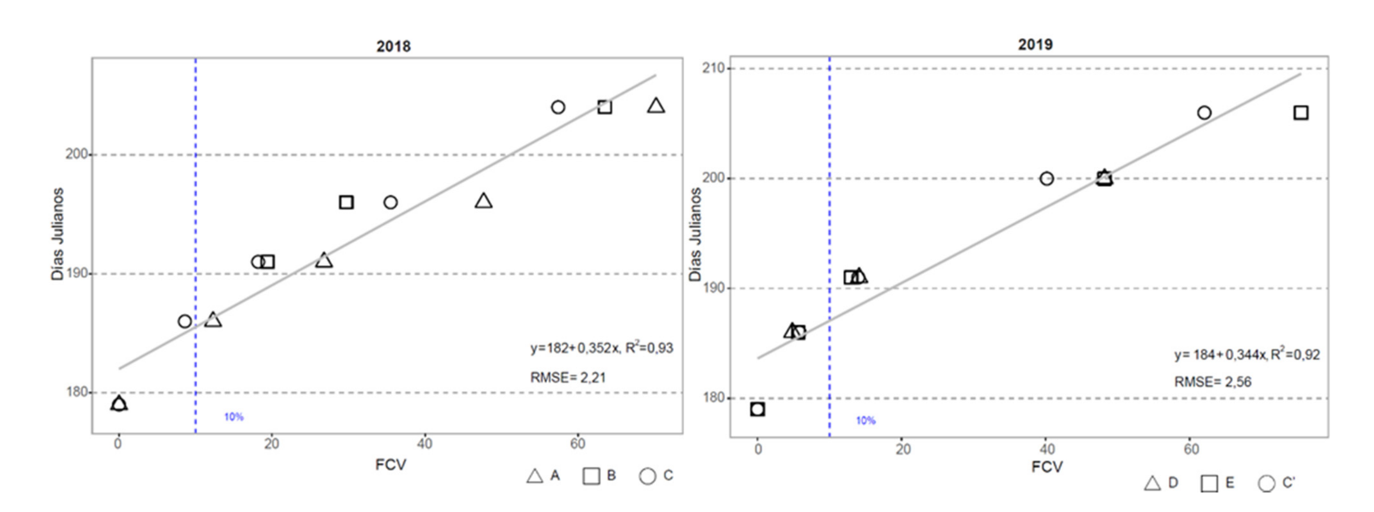


Figura 3. Relación entre el día juliano y la FCV estimada en campo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio se determinó primero el IED de referencia al 10% de FCV. Se aplicó a las series temporales de los tres IV elegidos la técnica de determinación de punto de cambio (prueba de Pettitt), se evaluaron comprobando la diferencia que existe con el IED-referencia. Además, valoró cómo afectaba a la predicción del IED la falta de imágenes o la introducción de nuevas imágenes de otro sensor. Los resultados obtenidos se describen a continuación.

3.1. Determinación de la FCV e IED de referencia

En la Figura 3 se presentan las relaciones lineales entre la escala temporal y las FCV, el coeficiente de determinación de (R^2) y el error medio cuadrático (RMSE). Se obtienen en los dos años de estudio altos R^2 y bajos RMSE. Las diferencias entre los dos años de estudio y entre cultivos son mínimas y se deben principalmente al manejo de las parcelas y al momento de siembra de los cultivos. En 2018 el IED en la zona de estudio se produce el día juliano 186 y en 2019 el día 187.

3.2. Determinación de IED con la serie temporal de Sentinel 2

Los resultados del IED determinado con la prueba de Pettitt para las series temporales de los tres IV se presentan en la Tabla 5. En general, el IED obtenido con la prueba de Pettitt se sitúa muy cercano al IED-referencia. El IV OSAVI en 2019 se diferencia de los otros dos empleados al determinar el IED unos días después que ellos, es el que más difiere del IED-referencia. La metodología desarrollada en este capítulo utiliza el filtro SG y una prueba de detección de punto de cambio para encontrar la fecha de transición. Tanto SG como las pruebas de detección de punto de cambio utilizadas no necesitan una serie temporal larga que cubran el ciclo completo del cultivo, pudiéndose utilizar para detectar el IED una serie de datos de únicamente las primeras etapas de crecimiento. Actualmente también se utilizan otras metodologías para detectar la fenología en tiempo casi real como hace Gao et al. (2020), con el enfoque WISE, en este caso determinan el *green-up* de 4 a 5 días después de la emergencia de cultivo, en estadio VE-V1 para maíz y VE-VC para soja. La diferencia con el trabajo que aquí se presenta es que el enfoque WISE lo hace sobre cultivos sin una cobertura anterior; en cambio, en este trabajo se ha aplicado la metodología propuesta en cultivos sobre rastrojo de cebada (cultivo anterior) y los restos de vegetación de cebada repercuten en la observación del nuevo cultivo, detectando el IED en estadio más avanzado, V2-V3.

Tabla 5. Determinación de IED por la prueba de Pettitt e IED-referencia

	MAÍZ 2018			*MAÍZ 2019*		
	NDRre	*NDVI*	*OSAVI*	*NDRre*	*NDVI*	*OSAVI*
Prueba de Pettitt	186	186	186	186	186	191
IDE-referencia	186			187		

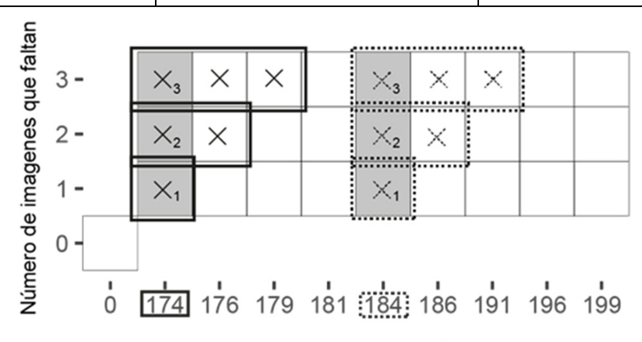


Figura 4. Ejemplo de los resultados obtenidos cuando las primeras imágenes que faltan son las de los días julianos 174 y 184.

3.3. Determinación de IED con la serie temporal de Sentinel 2 y la prueba de Pettitt simulando datos perdidos

La Figura 4 se muestra como ejemplo para interpretar los resultados del efecto de los datos perdidos en la determinación del IED. Las celdas con sombreado gris son el resultado de la diferencia entre el momento del IED y el momento de IED-referencia cuando se eliminan las imágenes. Se ha puesto el ejemplo cuando los datos perdidos comienzan el día juliano 174 y cuando comienzan el día 184. Así pues, cuando los datos

perdidos comienzan con la falta de imagen del día 174, el resultado se muestra en la celda X_1; cuando faltan dos imágenes correlativas –174 y 176– el resultado aparece en la celda X_2; por último, cuando se eliminan tres imágenes –174, 176 y 179– el resultado se muestra en la celda X_3. El mismo proceso se lleva a cabo cuando la falta de imágenes comienza en el día 184, el resultado se muestra en la celda X_1; cuando faltan dos imágenes correlativas –184 y 186– el resultado aparece en la celda X_2; por último, cuando se eliminan tres imágenes –184, 186 y 191– el resultado se muestra en la celda X_3. Este mismo proceso se lleva a cabo para todas las imágenes entre los días julianos 174 y 199. La celda 0 corresponde al IED obtenido cuando no se simulan datos perdidos.

En la Figura 5 se observan los resultados al aplicar la prueba de Pettitt en la serie temporal para los dos años de estudio añadiendo datos perdidos. Como ya se ha señalado, las imágenes en la zona de estudio tienen una recurrencia de 2 a 3 días si las condiciones atmosféricas son óptimas (no hay nubes), aunque estas condiciones óptimas pocas veces suceden, por lo que se generan vacíos o huecos temporales de imágenes. En los años de estudio se produjeron, en el peor de los casos, periodos de cinco días sin imágenes. En 2018 un periodo sin imágenes de 5 días sucede tan solo una vez del día juliano 191 al 196; en cambio, en 2019 este periodo de imágenes cada 5 días sucede 2 veces, del día juliano 186 al 191 y del día 191 al 196.

Los resultados muestran que, en 2018, cuando falta una imagen Sentinel 2, el IED obtenido no difiere o varía como máximo en un día respecto al IED de referencia, salvo en el caso de que la imagen eliminada coincida con el IED. Esto se aprecia claramente cuando se elimina la imagen del día juliano 186 en maíz, imagen que corresponde con el día del IED-referencia. El IED se determina entonces con 2 días de adelanto. Cuando el número de días sin datos es mayor, es decir, cuando se eliminan 2 y 3 imágenes consecutivas, los resultados varían en función de cuándo se produce la falta de imágenes. Si está cercana a la siembra, no afecta o afecta poco en la determinación del IED; en cambio, cuando las imágenes eliminadas se localizan cercanas al momento de IED, la fecha determinada se adelanta notablemente respecto a la IED de referencia, hasta 7 días, lo cual supondría que el IED se encontrase en la etapa fenológica del cultivo de emergencia, tan solo 5 días después de la siembra, no respondiendo a la realidad. En estas situaciones, por tanto, el resultado obtenido no es fiable. Cuando las imágenes descartadas son posteriores al IED, los resultados son no significativos, con intervalo de confianza es menor de 95%, por lo que la predicción del IED no es estadísticamente significativa.

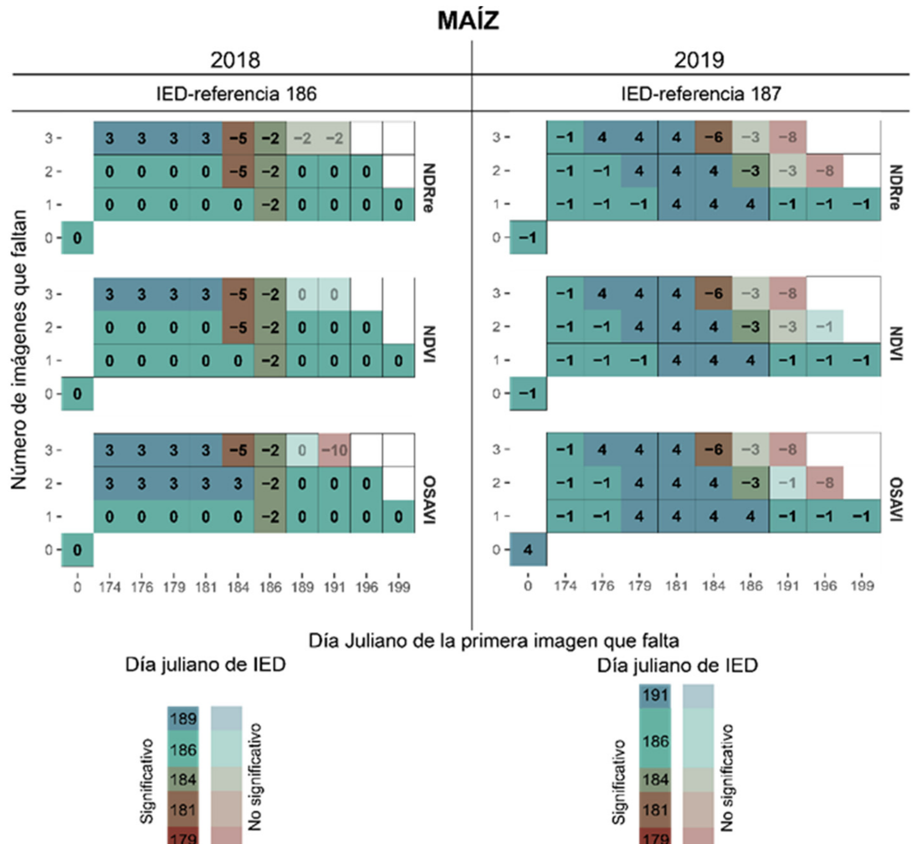


Figura 5. Diferencias del IED determinado para maíz mediante la prueba de Pettitt respecto al IDE-referencia para los tres IV. Nivel de significación p<0,05.

En 2019 la eliminación de imágenes produce los mismos efectos que en 2018. Como ya se ha señalado, en 2019 la periodicidad de las imágenes no siempre es de 2 o 3 días. En el año 2018 se disponía de la imagen 189, en cambio, en 2019 no la hay, siendo la siguiente imagen disponible la del día juliano 191, lo que conlleva una diferencia mayor entre el IED obtenido y el IED-referencia. Las diferencias entre localizar el IED 1 día antes del IED-referencia suponen que el IED se dé cuando el maíz está en estadio V2; si la diferencia con el IED-referencia es de 4 días después el maíz está en estadio V3. Los tres índices considerados se comportan de forma similar, si bien, en el año 2019 OSAVI proporciona resultados ligeramente más distantes del IED-referencia con toda la serie de datos. La carencia de datos en el momento en el que se produce el IED o en momentos posteriores no permite reflejar el momento real del IED, estimándose con anterioridad este momento. Esto mismo ocurre en el trabajo de Pan et al. (2021), donde la falta de imágenes en el punto de inflexión de la serie de tiempo de la combinación de índices NDVI y LSWI hace que no se pueda determinar el momento del crecimiento de los cultivos con exactitud. Por tanto, la metodología propuesta en este capítulo requiere para tener un resultado fiable (más/menos 2 días de error) disponer de imágenes al menos cada 2 o 3 días en el periodo anterior y posterior a producirse el IED.

3.4. Determinación de IED con la serie temporal de Sentinel 2 - UAV aplicando la prueba de Pettitt

En la Figura 6 se observan los resultados cuando se sustituyen los datos de Sentinel 2 por los de UAV para los tres IV de estudio. Cuando se utiliza el índice NDRre, los IED obtenidos al sustituir los datos de Sentinel 2 por los datos de UAV son muy similares a los obtenidos con la serie Sentinel 2 escenario 1. Únicamente se observa una pequeña diferencia cuando no hay datos perdidos en los escenarios 5 y 8.

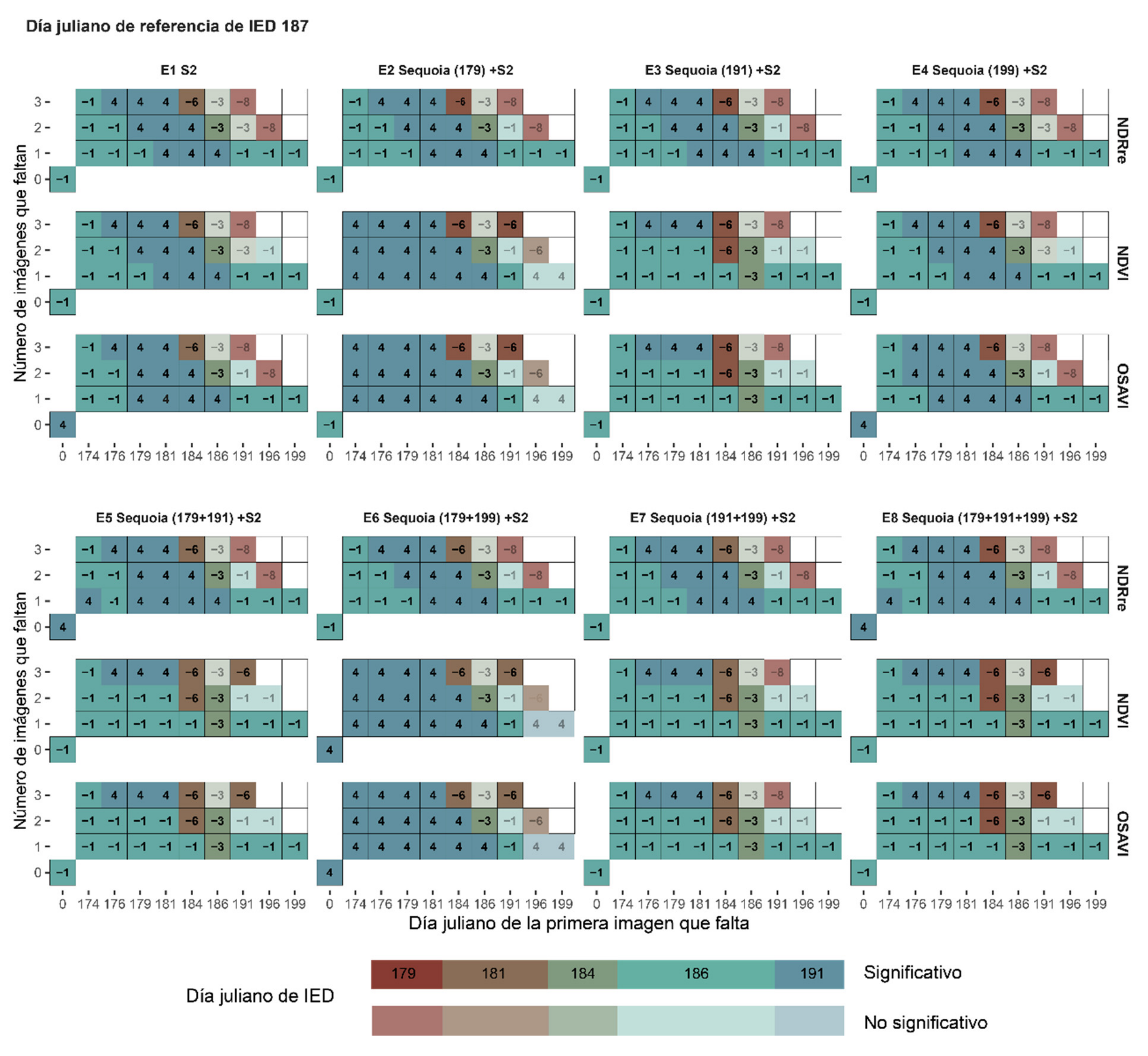


Figura 6. Diferencias del IED determinado para maíz mediante la prueba de Pettitt respecto al IED-referencia para los tres IV derivados de MSI de Sentinel y Sequoia en 2019 (serie temporal en días julianos). Nivel de significación p<0,05.

El IED con la serie temporal NDVI es igual al IED-referencia únicamente para el escenario 4, es decir, cuando se incorpora la imagen de Sequoia del día juliano 199 (final de la serie de datos). En cambio, en el resto de los escenarios se observa alguna diferencia. Los valores de NDVI son sistemáticamente más altos en Sequoia que en MSI de Sentinel 2. Esto hace que, al sustituir la imagen en los momentos del inicio de la serie y antes de que se determine el IED (día juliano 179), el sumatorio de la clasificación de los datos de la serie (Ecuación 2), al comienzo de la serie aumenta y por tanto el IED se produce más tarde en el escenario 2 y escenario 6, escenarios donde se incluyen los datos de UAV, respecto a cuándo se produce en el escenario 1. En el resto de los escenarios cuando la imagen que se sustituye se sitúa después de que se determine el IED sucede lo contrario (imagen del día juliano 191). El sumatorio de la clasificación aumenta en la parte final de la serie de datos de NDVI, haciendo que se determine antes el IED, por lo que el IED aparece antes en los escenarios 3 o 7 que en el 1. El índice OSAVI se comporta de forma similar al NDVI. En el escenario 4 no se observan diferencias, en cambio sí se producen en el resto de los escenarios.

Las series temporales en las que se han sustituido datos del sensor MSI de Sentinel 2 por Sequoia han arrojado resultados confiables, sobre todo cuando se utiliza el índice NDRre. Por lo que es factible completar con un vuelo UAV la serie temporal de datos de Sentinel 2. La limitación que presenta frente a Sentinel 2 es que solo será aplicable a escala de parcela o explotación ya que los vuelos con UAV dependen en gran medida de la duración de la batería.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo evidencian la viabilidad de integrar sensores espectrales satelitales y portados en UAV, así como la adecuación de pruebas de detección de puntos de cambio en series temporales. La detección del momento del IED aplicando la prueba de Pettitt con series de IV de MSI de Sentinel 2 resulta prometedora. Sin embargo, se debe confirmar su fiabilidad en regiones donde la recurrencia de imágenes sea inferior a la máxima de 2-3 días.

La prueba de Pettitt aplicada a series temporales de IV obtenidos con Sentinel 2 con un periodo de recurrencia aproximado a 2-3 días, permite determinar el IED de forma temprana. No obstante, existen diferencias en función de los neocanales o índices espectrales utilizados. Las series de NDRre y NDVI permiten determinar el IED antes que las de OSAVI, -1,5 a 1 día respecto al IED-referencia frente a -1 a 4 días. Disponer de una única imagen más en un momento crítico puede hacer que la determinación del IED sea más ajustada.

El impacto de los datos perdidos –que simula la posible falta de disponibilidad de imágenes procedentes de plataforma satelital– en la serie temporal para la determinación del IED varía según la duración del periodo sin imágenes y del momento del ciclo en el que se produce. Si el periodo sin imágenes se produce próximo a la siembra la determinación apenas se ve afectada; en cambio, cuando el periodo sin imágenes está cerca al IED, su determinación se adelanta notablemente. Esta eventualidad puede superarse mediante la integración imágenes de Sequoia en UAV en la serie temporal de MSI de Sentinel 2, pudiendo usarse de manera efectiva para la determinación del IED; siendo el índice NDRre el índice más adecuado en esta situación.

AGRADECIMIENTOS

La primera autora es beneficiaria de un contrato pre-doctoral MECD (FPU15/04783). Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno de Aragón (Geoforest S51_20R), FEDER “Construyendo Europa desde Aragón”. Los autores agradecen su colaboración a la Comunidad de Regantes de Almudévar y a los propietarios de las parcelas.

5. BIBLIOGRAFÍA

Bandaru, V., Yaramasu, R., PNVR, K., He, J., Fernando, S., Sahajpal, R., Wardlow, B. D., Suyker, A. y Justice, C. (2020). PhenoCrop: An integrated satellite-based framework to estimate physiological growth stages of corn and soybeans. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92, 102188. https://doi.org/10.1016/J.JAG.2020.102188

Casadesús, J., Biel, C. y Savé, R. (2005). Turf color measurement with conventional digital cameras. *EFITA/WCCA Joint Congress in Agriculture*, 804–811

Casadesús, J. y Villegas, D. (2014). Conventional digital cameras as a tool for assessing leaf area index and biomass for cereal breeding. *Journal of Integrative Plant Biology*, 56(1), 7–14. https://doi.org/10.1111/JIPB.12117

Gao, F., Anderson, M., Daughtry, C., Karnieli, A., Hively, D. y Kustas, W. (2020). A within-season approach for detecting early growth stages in corn and soybean using high temporal and spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, 242, 111752. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111752

Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R. y Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76–87. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9

Liu, L., Zhang, X., Yu, Y., Gao, F. y Yang, Z. (2018). Real-time monitoring of crop phenology in the Midwestern United States using VIIRS observations. *Remote Sensing*, 10(10), 1540. https://doi.org/10.3390/rs10101540

Malik, W. y Dechmi, F. (2019). DSSAT modelling for best irrigation management practices assessment under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 216, 27-43. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.017

Pan, L., Xia, H., Yang, J., Niu, W., Wang, R., Song, H., Guo, Y. y Qin, Y. (2021). Mapping cropping intensity in Huaihe basin using phenology algorithm, all Sentinel-2 and Landsat images in Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102, 102376. https://doi.org/10.1016/J.JAG.2021.102376

Pérez-Cardiel, E. (2022). *Teledetección multisensor para la identificación temprana consistente de cultivos en los regadíos de Aragón*. Tesis doctoral, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.

Pettitt, A. N. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126. https://doi.org/10.2307/2346729

Ritchie, S., Hanway, J. y Benson, G., (1986). *How a Corn Plant Develops*. Iowa State University, Special Report nº 48. http://publications.iowa.gov/18027/1/How%20a%20corn%20plant%20develops001.pdf

Rondeaux, G., Steven, M. y Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95–107. https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7

Rouse, J., Haas, R., Schell, J. y Deering, D. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp, 1(Sect. A), 309-317.

Ryberg, K. R., Hodgkins, G. A. y Dudley, R. W. (2020). Change points in annual peak streamflows: Method comparisons and historical change points in the United States. *Journal of Hydrology*, 583, 124307. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.124307

Savitzky, A. y Golay, M. J. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical chemistry*, 36(8), 1627-1639.

Verstraeten, G., Poesen, J., Demarée, G. y Salles, C. (2006). Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for assessing soil erosion rates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D22). https://doi.org/10.1029/2006JD007169



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 524-533

Cartografía multivariable para el análisis de la vulnerabilidad urbana y la incidencia de la COVID-19 en la ciudad de Zaragoza

R. Postigo Vidal[1], M. Zúñiga Antón[2], M. Caudevilla Lambán[3]

[1] *Escuela Universitaria de Turismo de Zaragoza, Universidad de Zaragoza. C/ Ecce Homo, 3, 50.003 Zaragoza.*
[2] *Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50.009 Zaragoza.*
[3] *Ayuntamiento de Villanúa. C. Escuelas, 8, 22870 Villanúa, Huesca.*

rpostigo@unizar.es, mz@unizar.es, mariacaudevillalam@gmail.com

RESUMEN: En el presente trabajo se realizan análisis cartográficos multivariables para mostrar la relación espacial entre los niveles de incidencia de la COVID-19 y los principales indicadores de vulnerabilidad sociodemográfica y socioeconómica a nivel intraurbano en la ciudad de Zaragoza.
Los modelos cartográficos diseñados utilizan leyendas de doble entrada para identificar espacios urbanos de vulnerabilidad múltiple que a su vez responden a una mayor exposición al virus. Estas cartografías emplean datos del padrón municipal de habitantes para representar indicadores de sobreenvejecimiento, nivel formativo, habitabilidad en el hogar y procedencia de la población. Índices que se unen a los de renta personal provenientes de "Cities-Urban Audit" (EUROSTAT-INE) y a los de incidencia en COVID-19 de la Dirección General de Salud Pública del Gobierno de Aragón.
Una de las dificultades de este tipo de análisis cartográficos es la falta de correspondencia espacial entre las bases de datos demográficas, económicas y sanitarias, y sus correspondientes niveles de desagregación (manzana – sección censal – Zona Básica de Salud). Para solventar estas problemáticas, es necesario atender a la multiescalaridad y plantear análisis cartográficos exploratorios como punto de partida para orientar la toma de decisiones en situaciones de pandemia o pospandemia y bajo parámetros de justicia social, prevención y protección de los grupos más vulnerables.

Palabras-clave: COVID-19, vulnerabilidad urbana, cartografía temática, Zaragoza.

1. INTRODUCCIÓN

Al igual que otras enfermedades infecciosas, la transmisión de COVID-19 se observa con mayor frecuencia en áreas urbanas (Kwok et al., 2021). Hasta tal punto que aproximadamente el 90% de los casos registrados por COVID-19 se han dado en ciudades (Xu, 2020). En este contexto, expertos en urbanismo y planificación territorial inciden en gestionar las ciudades adaptándose a una "nueva normalidad" pospandemia, reforzando los modelos de ciudad resiliente e igualitaria (Rodríguez-Barcón, 2020; Bolea, Postigo, López Escolano, 2022). Apostar por estos modelos son algunos de los aprendizajes de esta pandemia para diseñar y gestionar mejor las ciudades (Sharifi y Khavarian-Garmsir, 2020) reformular los estudios urbanos y reflexionar sobre antiguos problemas urbanos no satisfactoriamente superados, entre ellos, los de desigualdad urbana y el aumento multiescalar de la desigualdad socioespacial (González Pérez y Piñeira Mantiñán, 2020) que son especialmente visibles a escala intraurbana.

La pandemia ha dejado constancia de profundas desigualdades estructurales urbanas que dificultan la gestión contra la propagación del virus (Ezquiaga, 2020) lo que implica que no todos los grupos sociales ni todos los barrios puedan soportar esta situación en las mismas condiciones ni con los mismos instrumentos (González Pérez y Piñeira Mantiñán, 2020). Esta situación implica que los impactos del virus no se distribuyen de manera homogénea, sino que están ligados a estos factores de vulnerabilidad social, entendiéndola como la mayor predisposición de determinados colectivos a sufrir mayores daños (De las Obras-Loscertales, 2021; Zúñiga et al., 2021) o de estar más expuestos al riesgo de contagio y al mayor impacto de sus consecuencias.

En un reciente estudio de enfermería realizado en la ciudad de Zaragoza, se comprobó cómo la pan-

demia por COVID-19 afecta de manera más acusada a las poblaciones vulnerables, especialmente a la población extranjera y con menos recursos (Felipe Rubio y Canet Fajas, 2022). De esta forma existen evidencias de que las características socioeconómicas y sociodemográficas son factores que contribuyen a la transmisión de la COVID-19 (Kwok et al., 2021) y que las personas que provienen de áreas económicamente deprimidas y de las capas de la sociedad más vulnerables, con recursos limitados y condición socioeconómica más baja, tienen más dificultades para detener las consecuencias sociosanitarias de la pandemia (Mesa Vieira, 2020). Además, estas poblaciones experimentan limitaciones a la hora de mantener las medidas de distanciamiento social, debido a sus peores condiciones de vivienda o de entorno laboral que las hace estar más expuestas al riesgo de infección (Raymundo et al., 2021) e incluso ser más propensas a la reinfección (Markovič et al., 2021). Con todo ello, este estudio tiene como objetivo analizar la distribución espacial de los grupos sociales más vulnerables y conocer su asociación espacial o exposición a las zonas urbanas con mayor incidencia del virus. El análisis se realiza a partir de cartografía multivariable con leyendas de doble entrada, lo que posibilita la representación multivariable entre la tasa de frecuentación COVID-19 y diferentes indicadores de vulnerabilidad sociodemográfica y socioeconómica para identificar espacios y grupos que afrontan las situaciones pandémicas de manera desigual.

1.1. La multidimensionalidad de la vulnerabilidad urbana ligada a la COVID-19.

Investigaciones recientes relacionadas con la COVID-19 han corroborado la pertinencia de relacionar la incidencia del virus con indicadores multivariables de vulnerabilidad social en diferentes contextos geográficos y escalas de análisis espacial. Es el caso de Kwok et al. (2021), que analiza en Hong Kong las relaciones entre datos de casos de COVID-19 a escala urbana con factores sociodemográficos (perfil demográfico, educativo, socioeconómico, del hogar y de la vivienda) y otros atributos de geometría urbana (geometría del edificio, red vial y espacios verdes). Metodología similar a la de DuPre et al. (2021), que representa por condados estadounidenses una selección de índices sociodemográficos (edad media, sexo y procedencia) socioeconómicos (nivel escolar y nivel de empleo) e indicadores de condiciones de vida (personas que viven en hogares unipersonales). En el mismo contexto geográfico, Raifman y Raifman (2020) comprueba cómo la procedencia de la población y sus ingresos son factores que están altamente asociados con la exposición al virus. Enfoque muy similar al de Raymundo et al. (2021) que aplica el coeficiente de Gini para valorar las desigualdades económicas y la incidencia de la enfermedad a nivel municipal en Brasil. En Europa, y concretamente en Suecia, Drefahl et al. (2020) observó una relación positiva entre los factores sociodemográficos (género, ingresos, nivel educativo, estado civil y procedencia) y el número de víctimas por COVID-19.

En el contexto español se toma como referencia el artículo de González Pérez y Piñeira Mantiñán (2020) que aporta un análisis intraurbano para medir la desigualdad urbana en Palma (Mallorca) y estudiar lo que denomina la “Geografía del confinamiento”. Para ello emplea un índice sintético de vulnerabilidad urbana derivado de un Análisis de Componentes Principales (ACP) que concluye en la utilización efectiva de cuatro variables: población extranjera, población analfabeta o sin estudios, desempleo y nivel de renta. A ellas se une un análisis cualitativo a partir de una encuesta realizada a la ciudadanía a escala de barrio.

Otro estudio de gran interés es el recientemente desarrollado por de las Obras-Loscertales (2021) que representa cartográficamente un índice sintético de vulnerabilidad por manzanas urbanas, secciones censales y Zonas Básicas de Salud (ZBS) en la ciudad de Zaragoza. El índice se construye y pondera a partir de la técnica *Analytic Hierarchy Process (AHP)* y a través de una encuesta realizada a 404 personas de diferentes perfiles profesionales –Salud, Geografía, Social y otros–. El denominado índice de vulnerabilidad (IVsCovid-19) analiza conjuntamente el % de población extranjera, % de población mayor de 60 años, % de población analfabeta o sin estudios, % de población femenina, renta personal media, densidad de población y % de hogares con 5 o más personas viviendo en menos de 90 m^2.

Como antecedente directo al trabajo presentado es necesario nombrar el estudio de Bolea, Postigo y López Escolano (2022) donde se calcula la proximidad de los grupos de población vulnerable a las zonas verdes en la ciudad de Zaragoza. Para ello, representa cartográficamente índices de vulnerabilidad sociodemográfica y socioeconómica a una resolución de manzana urbana (% de población extranjera, renta personal media, % de población de 25 y más años sin estudios, índice de hacinamiento y densidad de población) y otros índices cualitativos obtenidos a partir de una encuesta que mide el comportamiento de la ciudadanía en momentos de confinamiento y desescalada con restricciones a la movilidad. De este análisis se extraen evidencias de injusticia ambiental y dualidades urbanas que pueden tener repercusiones en la salud y que se agravan en situaciones de pandemia y pospandemia.

1.2. La cartografía COVID-19 basada en índices de vulnerabilidad social. Una herramienta de apoyo a la toma de decisiones.

La "cartografía COVID-19" publicada hasta la fecha ha tenido dos funciones principales, por un lado, informar a la población en general sobre la evolución de la enfermedad y, por otro lado, facilitar la toma de decisiones por parte de las administraciones en asuntos como los confinamientos selectivos de la población, el seguimiento de la población más vulnerable o la aplicación de medidas de prevención (Guallart Moreno, 2020). Esta segunda tipología cartográfica es lo que Fatima et al. (2021) denomina la "cartografía de exposición al COVID-19", que explora la relación espacial entre los posibles factores de vulnerabilidad sociodemográfica, socioeconómica y epidemiológica que influyen en los patrones de la enfermedad. Herramientas que sirven de guía para la formulación de estrategias de control y la asignación de medidas preventivas de atención médica prioritarias para contener la enfermedad.

Este tipo de resultados cartográficos pueden realizarse mediante el análisis cuantitativo y cualitativo del espacio geográfico, de sus desigualdades y su vulnerabilidad, para así entender cómo influye la urbanización en las repercusiones, respuestas y recuperación frente a la COVID-19 (Naciones Unidas, 2020; Zúñiga et al. 2021). En este ámbito, la cartografía, las técnicas de análisis estadístico espacial y los SIG no se limitan exclusivamente a visualizar, sino a realizar análisis de autocorrelación espacial, agrupamiento o identificación de puntos críticos en cuanto a la ubicación específica de un grupo social específico y su exposición a la tasa de infección por COVID-19 (Ahasan et al., 2022). Enfoques geográfico-sanitarios que seguirán desempeñando un papel crucial más allá de esta crisis pandémica para saber dónde intervenir localmente, prevenir enfermedades (Fatima, 2021) identificar áreas de mayor riesgo para mejorar la calidad de la atención (Raymundo et al., 2021) así como mitigar emergencias de salud pública a escala urbana e intraurbana.

El grupo GEOT (Grupo de Estudios en Ordenación del Territorio del Departamento de la Universidad de Zaragoza), en colaboración con la Cátedra Territorio, Sociedad y Visualización Geográfica y el Ayuntamiento de Zaragoza, ha puesto al servicio de la gestión sociosanitaria una serie de herramientas cartográficas multiescalares y multivariables donde se relacionan espacialmente índices sociodemográficos y socioeconómicos de alto detalle con los datos epidemiológicos disponibles por Zona Básica de Salud (ZBS). Hasta la fecha, estos índices se han representado de manera separada en cartografías individuales o como composiciones de cartografías principales y complementarias. Sin embargo, con el objetivo de incidir en la representación multivariable de la vulnerabilidad social y su exposición a la pandemia, el estudio presentado en este trabajo relaciona en una sola herramienta cartográfica ambos conjuntos de datos a partir de leyendas de doble entrada. Esta metodología permitirá la identificación precisa de espacios urbanos más vulnerables y expuestos a la enfermedad.

2. METODOLOGÍA

La investigación se realiza a partir de la unión de la base cartográfica de las manzanas urbanas de la ciudad de Zaragoza, con la información sociodemográfica de su población residente proveniente del padrón municipal de población a 1 de enero de 2020 y facilitada por el Observatorio de Estadística del Ayuntamiento de Zaragoza (2020). Estos datos incluyen características demográficas, educativas, del hogar y de la vivienda.

De la unión y normalización de estas bases de datos temáticas y espaciales, realizada por el GEOT y la Cátedra Territorio, Sociedad y Visualización Geográfica, se obtiene un modelo geodemográfico de la ciudad de Zaragoza al que se incorporan otras bases de geodatos como los niveles de renta por sub-distritos del programa Urban Audit del Eurostat y el INE (2017) o las características de los hogares (m^2 de la vivienda, número de plantas del edificio, etc.) obtenidos de la sede electrónica del Catastro (2020).

Para los datos epidemiológicos se ha seleccionado la Tasa de Frecuentación COVID-19 desde abril de 2020 hasta el 17 de julio de 2021, publicados semanalmente por la Dirección General de Asistencia Sanitaria de Gobierno de Aragón. Esta se entiende como el número de pacientes infectados o con sospecha de estar infectados según registro de los Centros de Salud Públicos por 100.000 habitantes. Los datos se facilitan por Zonas Básicas de Salud (ZBS), que es la unidad de gestión de referencia utilizada por el sistema sanitario.

La metodología utilizada se estructura en tres fases cartográficas diferentes que se encuentran interconectadas (Figura 1):

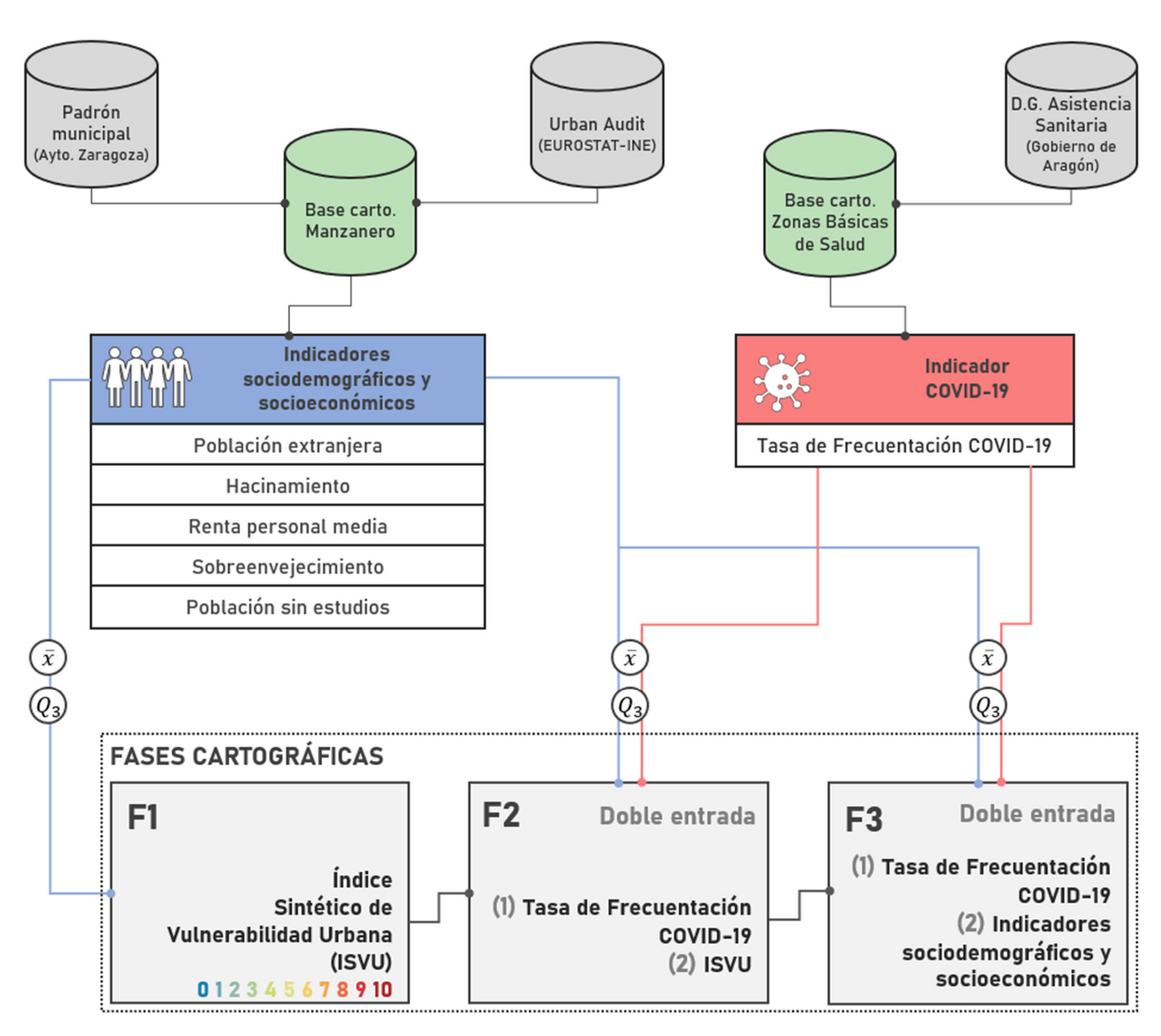


Figura 1. Esquema metodológico, datos y fases cartográficas.

- **Fase 1. Cartografía de la vulnerabilidad urbana por manzana (Figura 2)**. El mapa muestra a nivel de manzana un Índice Sintético de Vulnerabilidad Urbana (ISVU) construido a partir de cinco indicadores que ya han sido probados y contrastados en la ciudad de Zaragoza (Postigo, Alonso y Pueyo 2020): (1) % de población extranjera, (2) nivel de hacinamiento (habitantes/ m^2 de la vivienda), (3) % de población sin estudios (4) % de población sobreenvejecida y (5) nivel de renta personal medio. Para ponderar el nivel de vulnerabilidad se definen dos umbrales; el valor promedio de la serie ($\bar{x}$) y el valor extremo definido por el tercer cuartil (Q_3). De esta forma si la manzana tiene un valor superior a $\bar{x}$, esta sumará "1" y si supera el Q_3 la manzana sumará "2". Este proceso se repite para los cinco indicadores, por consiguiente, el valor total de vulnerabilidad estará comprendido entre 0 (baja o nula vulnerabilidad) y 10 (alta o máxima vulnerabilidad). Mediante una leyenda divergente de color-valor y el total de la población que reside en cada manzana representada con la variable visual tamaño, es posible identificar con precisión las manzanas de mayor vulnerabilidad.
- **Fase 2. Cartografía de vulnerabilidad urbana por manzana y zonas de incidencia COVID-19 (Figura 3)**. En un solo mapa se muestra la relación entre vulnerabilidad urbana mostrada en la Fase 1 (ordenadas) y la Tasa de Frecuentación COVID-19 (abscisas). Para obtener esta relación espacial se emplea una leyenda de doble entrada con los nombrados umbrales ($\bar{x}$ y Q_3). El uso del color y el valor en este mapa logra resaltar visualmente las manzanas urbanas más vulnerables y que potencialmente han estado más expuestas al contagio.
- **Fase 3. Cartografías complementarias de vulnerabilidad urbana e incidencia COVID-19 por ZBS (Figura 4)**. Una serie de 6 cartografías complementarias a nivel de ZBS permiten reforzar la Fase 2. A partir de una

leyenda de doble entrada se relaciona la Tasa de Frecuentación COVID-19 con los principales índices de vulnerabilidad urbana enumerados en la Fase 1 lo que permite localizar las ZBS más desfavorecidas y que paralelamente han sufrido la crisis sanitaria con mayor intensidad. Estas cartografías aportan un análisis exploratorio de posibles correlaciones entre ambas variables.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, debemos atender a los resultados de la cartografía de vulnerabilidad urbana a escala de manzana (Figura 2). La cartografía muestra una ciudad dual o desigual donde quedan representadas en colores cálidos las manzanas con un índice de vulnerabilidad más elevado. Estas áreas se identifican con los barrios más tradicionales de la ciudad de Zaragoza. Espacios urbanos con mayor densidad demográfica y edificatoria que especialmente se concentran en Delicias, Las Fuentes, Torrero-La Paz, Venecia, Oliver, Arrabal o San José Sur. Barrios densos que a su vez soportan mayores niveles de vulnerabilidad social y económica (sobreenvejecimiento, población extranjera, sin estudios y bajos niveles de renta) en pisos más pequeños y con más residentes, es decir, con un mayor índice de hacinamiento. Esta realidad contrasta con las manzanas del eje central y el arco sur de la ciudad, que revelan con colores fríos índices bajos de vulnerabilidad derivados de una población más joven, nacional y con rentas o niveles formativos por encima de la media que viven en pisos más grandes con mejores condiciones de habitabilidad.

Por otra parte, la relación espacial entre el índice de vulnerabilidad y los datos de incidencia COVID-19 (Figura 3 y Figura 4) permite desvelar, desde múltiples prismas o variables, aquellos espacios urbanos más sensibles ante la situación pandémica. Los resultados resaltan visualmente las zonas de Delicias, San Pablo o Venecia, que además de soportar mayores debilidades sociales y económicas, han experimentado una sobreexposición al virus por encima del tercer cuartil de incidencia. En menor medida, Oliver y Valdefierro también muestran situaciones de contagio y vulnerabilidad por encima de la media. Por el contrario, zonas como Miralbueno o Bombarda, han tenido niveles de contagio elevados, pero su población dispone de mejores condiciones de vida y habitabilidad para hacer frente a la enfermedad. Circunstancias similares a las existentes en la zona de Fernando el Católico, que sin embargo muestra un mayor nivel de sobreenvejecimiento, lo que añade una dimensión de vulnerabilidad especialmente sensible ante el virus.

Las zonas más céntricas de la ciudad como Independencia, Madre Vedruna o Sagasta-Ruiseñores, junto con barrios más nuevos, rejuvenecidos y periféricos como Valdespartera-Montecanal y Actur (Norte y Sur) muestran bajos niveles de vulnerabilidad e incidencia. En estas zonas, los factores sociodemográficos, socioeconómicos y, en definitiva, las mejores condiciones de vida han aportado la resiliencia necesaria para favorecer una mejor contención del contagio.

Mención aparte se merecen ejemplos concretos como Casablanca, Actur Oeste, Zalfonada, La Almozara, o Torrero-La Paz, que muestran notables desigualdades internas entre manzanas y que manifiestan la importancia de emplear cartografías multiescalares para visibilizar matices y realidades que con niveles más agregados como las secciones censales o las ZBS resultan invisibles o enmascaran parcialmente dichas dualidades internas.

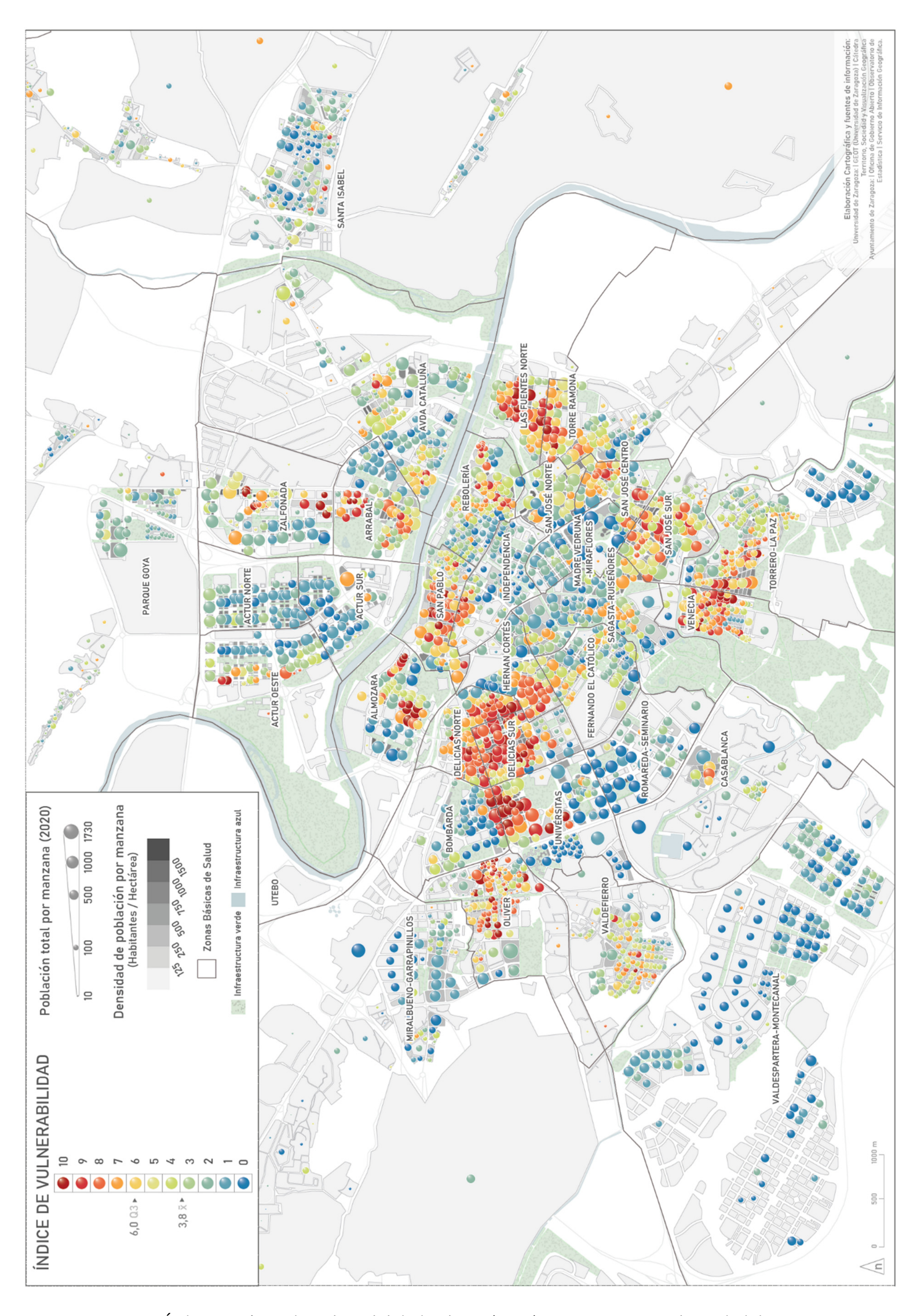


Figura 2. Índice Sintético de Vulnerabilidad Urbana (ISVU) por manzanas en la ciudad de Zaragoza.

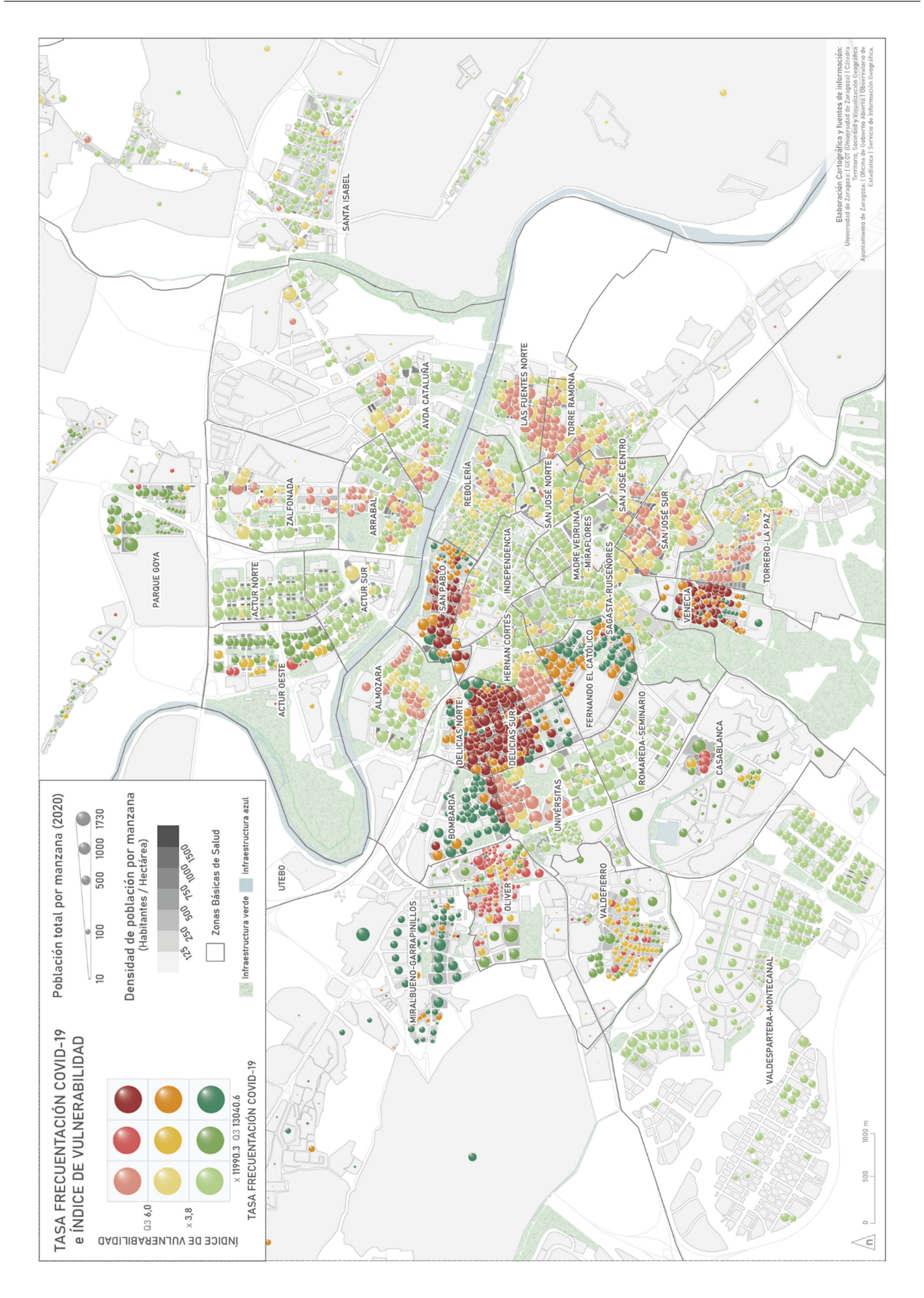


Figura 3. Cartografía multidimensional de doble entrada entre la Tasa de Frecuentación COVID-19 y el Índice de Vulnerabilidad Urbana por manzana en la ciudad de Zaragoza.

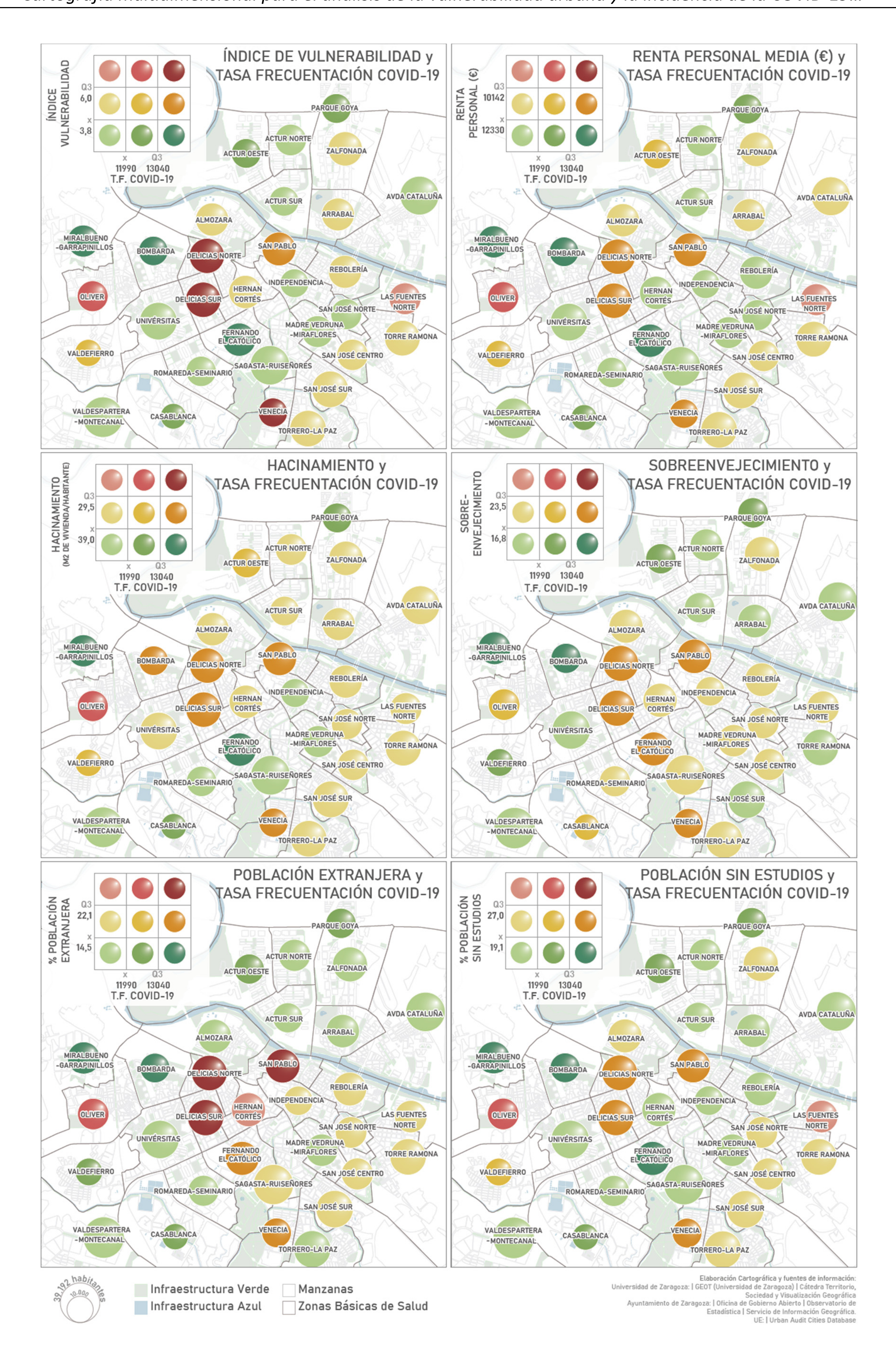


Figura 4. Cartografías multidimensionales de doble entrada entre la Tasa de Frecuentación COVID-19 y los principales índices de vulnerabilidad urbana por ZBS en la ciudad de Zaragoza.

4. CONCLUSIONES

Las cartografías multidimensionales presentadas en este trabajo se han diseñado con el convencimiento de que las consecuencias de la pandemia por COVID-19 no afectan de manera homogénea en las ciudades y que son las características de vulnerabilidad urbana las que generan una diferente respuesta a estos impactos. De este modo, los resultados del análisis cartográfico demuestran la existencia de marcadas brechas sociales y económicas a escala intraurbana. Espacios y grupos de población con debilidades sociales, económicas y de habitabilidad que residen en barrios de alta incidencia del virus. Ello ha podido influir en la salud de sus residentes, así como hacer más propicia la propagación del virus.

En futuras investigaciones sería pertinente profundizar en el análisis cartográfico de la vulnerabilidad y las condiciones de vida dentro y fuera de la vivienda (proximidad a zonas verdes o espacios públicos abiertos y de calidad) con otros índices cualitativos y de comportamiento como los que analizan Bolea, Postigo y López Escolano (2022) o la encuesta "*Impulsando Zaragoza frente a la COVID-19*" realizada por el Ayuntamiento de Zaragoza (2021). La combinación de estas líneas puede ofrecer una visión más holística, abordando la problemática desde múltiples dimensiones temáticas, perceptuales y temporales: confinamiento estricto, confinamientos perimetrales con limitaciones a la movilidad, y finalmente, la nueva normalidad pospandémica. Escenarios temporales diferentes, donde las necesidades humanas ligadas a los espacios de vida cambian.

Las cartografías empleadas para este estudio se basan en análisis geodemográficos multidimensionales y multiescalares que permiten aproximarse en mayor medida a la escala fenomenológica de la problemática y evitar parcialmente la falacia ecológica proveniente del enmascaramiento de los datos agregados por ZBS. Sin embargo, entre las limitaciones del estudio destaca la ausencia de datos de casos COVID-19, mortalidad o letalidad a un mismo nivel de desagregación que los datos de población. Trabajar con estos datos desagregados por manzana o portal permitiría la realización de análisis más precisos para trazar trayectorias de correlación espacial del virus o abordar análisis predictivos más complejos capaces de aportar herramientas cartográficas de alerta temprana. Conociendo estas limitaciones, las cartografías aquí presentadas se consideran una herramienta de ayuda a la toma de decisiones para una planificación urbana más inteligente y capaz de afrontar posibles nuevas crisis epidemiológicas, ofreciendo recursos para ganar en resiliencia, equidad y justicia socioespacial en las ciudades.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el Proyecto I+D+I del Ministerio de Ciencia e Innovación "La propagación espaciotemporal de la COVID-19 (Sars-CoV-2) en España y su relación multiescalar con los patrones de movilidad cotidiana y vulnerabilidad sociodemográfica (GEOCOVID-19)".

5. BIBLIOGRAFÍA

Ahasan R., Alam M.S., Chakraborty T. y Hossain M.M. (2022). Aplicaciones de SIG y análisis geoespaciales en la investigación de COVID-19: una revisión sistemática. *F1000Research*, 9, 1-20. https://doi.org/10.12688/f1000research.27544.2

Ayuntamiento de Zaragoza (2021). *Encuesta para la evaluación de las condiciones de vida, percepción y valoración emocional del ciudadano durante el confinamiento*. Extraído el 18 de junio de 2022 desde https://www.zaragoza.es/sede/portal/coronavirus/encuesta/

Bolea, N., Postigo, R. y López Escolano, C. (2022). Valoración de la proximidad a las Zonas Verdes Urbanas de la ciudad de Zaragoza como estrategia de adaptación a situaciones pandémicas. *Ciudades*, 25, 79-106. https://doi.org/10.24197/ciudades.25.2022.79-106

De las Obras-Loscertales, J. (2021). *Análisis de la vulnerabilidad social ante COVID-19 en la ciudad de Zaragoza. Construcción y representación cartográfica mediante indicadores socioeconómicos*. Universidad de Zaragoza.

Drefahl, S., Wallace, M., Mussino, E., Aradhya, S., Kolk, M., Brandén, M., Malmberg, B. y Andersson, G. (2020). *Nature Communications*, 11, 1-7. https://doi.org/10.1038/s41467-020-18926-3

DuPre, N., Karimi, S., Zhang, C., Blair, L. Gupta, A., Mousa, L., Alharbi, A., Alluhibi, M., Mitra, R., McKinney, W.P. y Little, B. (2020). County-level demographic, social, economic, and lifestyle correlates of COVID-19 infection and death trajectories during the first wave of the pandemic in the United States. *Science of the Total Environment*, 786, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147495

Ezquiaga, J. M. (2020). Hay que defender la ciudad: de la distopía del confinamiento a la ciudad abierta. *ACE-Architecture, City and Environment*, 43, 1-45. https://dx.doi.org/10.5821/ace.15.43.9518

Fatima, M., O'Keefe, K.J., Wei, W., Arshad, S. y Gruebner, O (2021). Geospatial Analysis of COVID-19: A Scoping Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 18, 2336. https://doi.org/10.3390/ijerph18052336

Felipe Rubio, A. y Canet Fajas, C. (2022). Características de la población afectada por COVID-19 en un centro de salud urbano de Zaragoza. *Metas de enfermería*, 25, 25-32. https://10.35667/MetasEnf.2022.25.1003081881

González Pérez, J. M. y Piñeira Mantiñán, M. J. (2020). The unequal city in Palma (Majorca): Geography of confinement during the COVID-19 pandemic. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 87, 1-42. https://doi.org/10.21138/bage.2998

Guallart Moreno, C. (2020). La cartografía general generada por la COVID-19: Análisis y tipologías. *Espacio, Tiempo y Forma. Serie VI Geografía*, 13, 103-134. http://dx.doi.org/10.5944/etfvi.13.2020.27806

Postigo, R., Alonso, M.P. y Pueyo, Á. (2020). La cartografía temática una herramienta para la espacialización de los indicadores geodemográficos en la planificación estratégica urbana. En Salom Carrasco, J. (Coord.), *Las áreas metropolitanas españolas entre la competitividad y la sostenibilidad: nuevas herramientas para una política urbana en el contexto global* (pp. 35-61). Valencia, Tirant Lo Blanch. Humanidades.

Kwok, C.Y.T., Wong, M.S., Chan, K.L., Kwan, M.P., Nichol, J.E., Liu,C.H., Wong, J.Y.H., Wai, A.K.C., Chan, L.W.C., Xu, Y., Li, H., Huang, J. y Kan, Z. (2021). Spatial analysis of the impact of urban geometry and socio-demographic characteristics on COVID-19, a study in Hong Kong. *Science of The Total Environment*, 764, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144455.

Markovič, R. Šterk, M., Marhl, M., Perc, M. y Gosak, M. (2021). Socio-demographic and health factors drive the epidemic progression and should guide vaccination strategies for best COVID-19 containment. *Results in Physics*, 26, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104433

Mesa Vieira, C., Francho, O. H., Gómez Restrepo, C. y Abel, T. (2020). COVID-19: The forgotten priorities of the pandemic. *Maturitas*, 136, 38-41. https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2020.04.004

Naciones Unidas (2020). *Documento de políticas: La COVID-19 en un mundo urbano*. https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/covid-19_in_an_urban_world_spanish.pdf

Raifman, M.A. y Raifman, J.R. (2020). Disparities in the Population at Risk of Severe Illness From COVID-19 by Race/Ethnicity and Income. *American Journal of Preventive Medicine*, 59, 137-139. https://doi.org/10.1016/j.amepre.2020.04.003.

Raymundo, C.E., Oliveira, M.C., Eleuterio, T., André, S.R. y da Silva M.G., Queiroz E. (2021) Spatial analysis of COVID-19 incidence and the sociodemographic context in Brazil. *PLoS ONE,* 16, 1-16. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247794

Rodríguez-Barcón, A. (2020). Post-covid city: what are we talking about? windows of opportunity for a more resilient and egalitarian city. *Finisterra*, 55, 237-242. https://doi.org/10.18055/Finis20326

Sharifi, A. y Khavarian-Garmsir, A.R. (2020). The COVID-19 pandemic: Impacts on cities and major lessons for urban planning, design, and management. *Science of the Total Environment,* 749, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142391

Xu, H. (2020). *Urban Development and Future Cities: Towards Building Back a Better Post COVID-19 Kuwait*. PNUD. Extraído el 18 de junio de 2022 desde https://www-test.undp.org/es/node/8296

Zúñiga, A., Postigo, R. y Pueyo, Á. (2020). Herramientas espaciales para la mejora de la información en alerta sanitaria por Covid-19. *Geographicalia*, 72, 141-145. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2020725005

Zúñiga, M., Postigo, R., Valdivielso, S., Sebastián, M., Bentué, C., Caudevilla, M. y Pueyo, Á. (2021). Mapas VS COVID-19: La cartografía temática como herramienta de apoyo para la mejora de la gestión de la información en alerta sanitaria de la COVID-19 en la ciudad de Zaragoza. En García Rodríguez, J.L. (Ed.). *Geografía, cambio global y sostenibilidad*. XXVII Congreso de la AGE. (pp. 199-223). Tenerife, AGE. http://doi.org/10.25145/c.27.Asociacion.Geografia.2021.14



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 534-542

Evaluación del modelo cronourbanista de la "Ciudad de los 15 minutos" en Zaragoza

N. Quílez Aznar[1], M. Zúñiga Antón[2], C. Bentué Martínez[2]

[1] *Departamento SIG y ambiental, IBER Sostenibilidad y Desarrollo.*
[2] *Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.*

nacho.quilez4@gmail.com, mz@unizar.es, cbentue@unizar.es

RESUMEN: Desde mediados del siglo anterior, el proceso de urbanización ha crecido considerablemente en todo el mundo. El desarrollo de muchas ciudades se ha guiado bajo las líneas del urbanismo del petróleo, aquel que ha creado urbes para el vehículo rodado, olvidando al principal sujeto que la habita, el humano. La actual crisis climática y sanitaria a la que se enfrenta este siglo XXI pone en entredicho el sistema urbano prestablecido. Por ello, al igual que en otras épocas en las que se han diseñado nuevas ideas de planificación urbana, en la actualidad existen programas internaciones como los ODS o la Nueva Agenda Urbana con los que se fijan metas e iniciativas para alcanzarlas. En este contexto, nace en París el concepto de "Ciudad de 15 minutos", postulada como modelo urbano con el que resolver las problemáticas económicas, ambientales y sociales de nuestro tiempo. El presente trabajo estudia la situación de Zaragoza respecto a este modelo cronourbanista, analizando tres de sus principios fundamentales: la ciudad debe ser compacta al mismo tiempo que presenta una complejidad elevada y ser accesible haciendo uso de la movilidad activa; además de valorar iniciativas de participación ciudadana. La creación de un nuevo índice que asocia estos tres indicadores urbanos junto con la representación cartográfica de los resultados permite identificar la distribución espacial de este modelo urbano en Zaragoza. Dando a conocer el hecho de que no se trata de una ciudad de 15 minutos en su totalidad, si bien presenta zonas donde sí que se aprecia este modelo. Por tanto, resulta necesario analizar nuestras ciudades para identificar las líneas de acción que debe seguir el urbanismo táctico integral del futuro.

Palabras-clave: Ciudad de 15 minutos, indicadores urbanos, compacidad, complejidad, accesibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ¿Por qué un modelo de ciudad de 15 minutos?

En el siglo XXI, llamado a ser el de las ciudades (Rubiales, 2019), resulta ser especialmente necesario la mejora de ciertos aspectos sociales, económicos y medioambientales. La crisis climática y sanitaria a la que nos enfrentamos está teniendo efectos insospechados que afectan de manera directa sobre nuestro modo de vida, por ello, nos encontramos ante un cambio de paradigma que evidencia no solo la transformación del modelo productivo, sino la forma en la que vivimos la ciudad.

Son muchos los diseños e ideas propuestas para mejorar los problemas urbanos, varios programas nacionales e internacionales como pueden ser los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la Nueva Agenda Urbana de HABITAT III, la Nueva Carta de Atenas, la Agenda Urbana para la Unión Europea o la Agenda Urbana Española, han destacado la urgencia con la que hay que actuar, proponiendo planes de acción y metas que tratan de evitar el colapso económico, ambiental y social, pudiendo ser resumidas en los siguientes principios generales que deben seguir las ciudades del s. XXI. (Figura 1).

La ciudad del cuarto de hora nace en París, de la mano del científico Carlos Moreno, director de la Catedra ETI (Empresariado Territorio Innovación) (Chaire Entrepreneuriat Territoire Innovation, 2020).

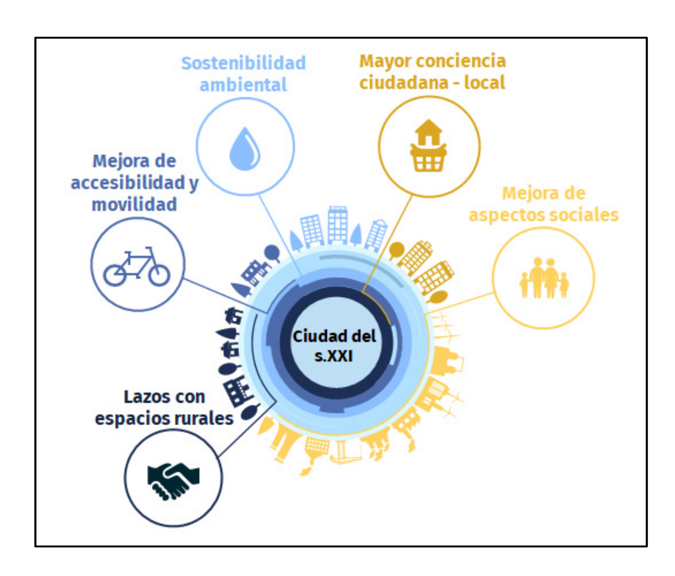


Figura 1. Principios generales de la ciudad del s. XXI.

Este modelo de ciudad, basado en la proximidad y el policentrismo aspira a consolidar espacios "viables" donde convergen la economía y la ecología; "equitativos" con una economía consciente de los actos sociales; y "habitables", es decir, que exista una estrecha relación entre impacto social y ecología (CICIM, 2020). Para lograr estos ideales urbanos, Moreno habla de 6 actividades (vivir, trabajar, abastecerse, cuidar, aprender y disfrutar) que deben poder ser desempeñadas en un radio de 15 minutos desde tu hogar, mediante desplazamientos a pie o en bicicleta, la denominada movilidad activa (LA Network, 2020).

En 2020 la alcaldesa de París Anne Hidalgo lo incluyó en su programa electoral y desde ese momento, esta planificación urbana ha tenido gran aceptación por proponer ideas contrarias al urbanismo del petróleo, apostando por ciudades para sus habitantes al planificar de abajo a arriba, basándose en la experiencia cotidiana y las necesidades de los ciudadanos (Jacobs, 1961). El hecho de emerger como modelo urbano sostenible, saludable, cuidador y resiliente, que incorpora requisitos urbanos fundamentales como la compacidad, complejidad y la accesibilidad para todos los ciudadanos (Mardones, et al., 2020) le ha servido para ser respaldado por el Grupo Climático C – 40, por enmarcarse en el cumplimiento de los ODS y seguir las líneas de acción de ONU Hábitat III.

En definitiva, esta ciudad de 15 minutos aspira a un urbanismo basado en la ciudad tradicional mediterránea, caracterizada por espacios continuos, densos y bien cohesionados, en los que la mixtura de usos, la proximidad y una buena red de comunicación facilita una vida llena de interacciones sociales (ETSAM, 2021).

1.2. ¿Qué aporta la participación ciudadana en el diseño de una ciudad de 15 minutos?

La ciudad de los 15 minutos implica a los ciudadanos en la toma de decisiones, esta participación activa de la sociedad se vincula con la gobernanza de abajo arriba, donde la cotidianeidad individual se postula como principal fuente de conocimiento a la hora de aplicar políticas. Por tanto, escuchar las diferentes problemáticas, propuestas, demandas y soluciones urbanas de los habitantes, evidencia un primer paso hacia ese modelo de ciudad en pos de la calidad de vida (Flanagin y Metzger, 2008).

Una de las líneas de acción que ha desarrollado el ayuntamiento de Zaragoza desde su portal web (https://www.zaragoza.es/sede/) es Gobierno Abierto, donde se puede observar esa transparencia e interés por la opinión de los ciudadanos. Además de lanzar encuestas y presentar datos públicos, en noviembre de 2020, se crearon los Mapas Colaborativos, una herramienta SIG con la que cualquier ciudadano puede digitalizar las localizaciones que considere de interés, respondiendo a diferentes cuestiones.

2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN Y OBJETIVOS

Este trabajo trata de responder a dos preguntas: ¿Es Zaragoza una ciudad de 15 minutos? y ¿Qué pueden aportar los procesos de participación en un diseño de ciudad de 15 minutos?

Por tanto, el objetivo general se resume en evaluar la adecuación de Zaragoza a este modelo urbano cronourbanista, incorporando para ello iniciativas de participación ciudadana.

Además, también se plantean objetivos específicos como:

- Calcular indicadores de compacidad, complejidad y accesibilidad
- Incorporar al análisis datos procedentes de participación ciudadana desarrollados por el Ayuntamiento de Zaragoza.

3. METODOLOGÍA

3.1. Indicadores Urbanos

Para la evaluación del modelo de ciudad de los 15 minutos en el área urbana de Zaragoza se llevan a cabo cinco análisis para dar respuesta a los objetivos planteados.

3.1.1. Compacidad

La compacidad es una de las variables más utilizadas para caracterizar la forma del espacio urbano construido (Escolano, 2018), puesto que expresa la proximidad de los componentes físicos. Existen dos procedimientos complementarios de calcular este indicador:

- Compacidad Absoluta: relaciona el volumen edificado y la superficie de suelo total en un área urbana, expresa por tanto la presión que ejerce la edificación sobre el tejido urbano (Rueda, 2010).

$$Compacidad\ Absoluta = Volumen\ edificado\ (m^3)\ /\ Unidad\ de\ superficie\ (m^2)$$

- Compacidad Corregida: esta “variante” del cálculo de compacidad absoluta permite incorporar al indicador los usos del suelo, al relacionar el volumen edificado con los espacios públicos atenuantes de un área urbana, entendidos como los lugares de encuentro, convivencia y relación con la naturaleza.

$$Compacidad\ Corregida = Volumen\ edificado\ (m^3)\ /\ Espacio\ público\ de\ estancia\ (m^2)$$

3.1.2. Complejidad

Como apuntan (Marín y Palomares, 2020) la complejidad “es una medida de la organización del sistema urbano que informa del grado de diversidad de usos y servicios que dotan la ciudad”, por ello, es fundamental conocer el grado de multifuncionalidad de cada uno de los espacios, puesto que la ciudad de los 15 minutos entraña una complejidad elevada (Bustos, 2015).

Existen múltiples indicadores que permiten calcular la complejidad urbana desde diferentes lentes que expresan la diversidad de estos espacios. De acuerdo a la bibliografía consultada, el método más común es el Índice de Shannon procedente de la teoría de la información (Rueda, 2010).

$$\boldsymbol{H = (-\sum_{i=0}^{n} P_i\, Log_2\, P_i)}$$

3.1.3. Accesibilidad sostenible

Además de movilidad sostenible, existe otro término relevante, conocido como accesibilidad sostenible. Se entiende como, aquella que potencia el acceso a bienes y servicios valiéndose de la capacidad del ser humano de desplazarse a pie o en bicicleta (Sanz, 1997). En otros términos: hace referencia a la movilidad activa. Una ciudad compacta y compleja también debe ser accesible, es decir, debe poner a disposición del ciudadano todas las facilidades para que sus necesidades cotidianas queden cubiertas en un radio máximo de 15 minutos.

Para medir la accesibilidad urbana a los distintos espacios y servicios estructurantes de Zaragoza, se ha llevado a cabo un análisis de redes, en el que se calculan diferentes áreas de servicio, obteniendo las regiones que engloban todas las calles accesibles a cada servicio aplicando una impedancia temporal de 5, 10 y 15 minutos.

3.1.4. La Ciudad de los 15 minutos en Zaragoza

Como resultado final, se pretende dar una visión clara de la situación en la que se encuentra la ciudad de Zaragoza teniendo en cuenta los tres indicadores al mismo tiempo. Para ello se ha creado un índice de

Ciudad de 15 minutos, en el que se clasifican las diferentes clases de los tres indicadores que lo compone.

$$\acute{I}ndice\ de\ Ciudad\ de\ 15\ minutos =$$
$$Clase\ de\ Compacidad * Clase\ de\ Complejidad * Clase\ de\ Accesibilidad$$

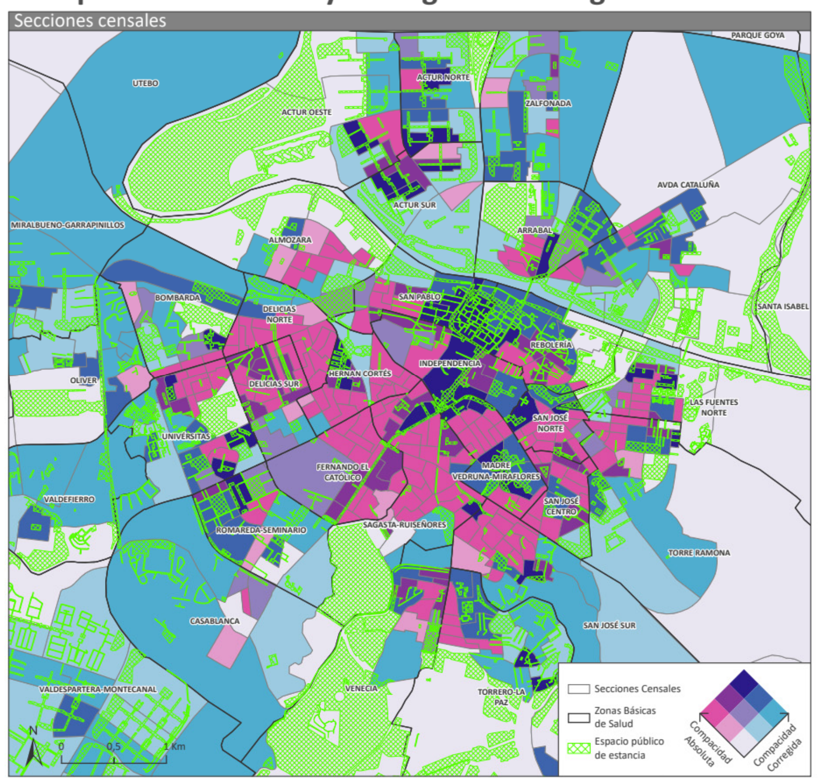
3.1.5. Participación ciudadana – Mapas Colaborativos

Dos de las temáticas propuestas por los Mapas Colaborativos del Ayuntamiento de Zaragoza son: Me cambio de casa y ¿Qué quiero cerca? En la primera se localizan las zonas de la ciudad más atractivas para cambiarse de domicilio, seleccionando por tanto aquellas localizaciones donde el ciudadano ve cubiertas sus necesidades, en cambio, con el segundo mapa se aspira a conocer precisamente los motivos por los cuales una persona puede mudarse, al localizar los equipamientos y servicios que faltan y que son necesarios.

4. PRINCIPALES RESULTADOS

4.1.1. Compacidad

Las secciones censales con mejores resultados (color azul oscuro) son las más próximas a Plaza España, el paseo Independencia, plaza de los Sitios, al parque Miraflores, las secciones entre Univérsitas y Romareda – Seminario, otra zona en Hernán Cortés al suroeste de la estación Zaragoza- Portillo y distintas secciones localizadas en Rebolería, Actur Norte y Sur, Arrabal o las ubicadas al oeste de Las Fuentes Norte. Las secciones que registran valores más bajos de compacidad se encuentran a las afueras, debido en gran medida a su bajo volumen edificado.



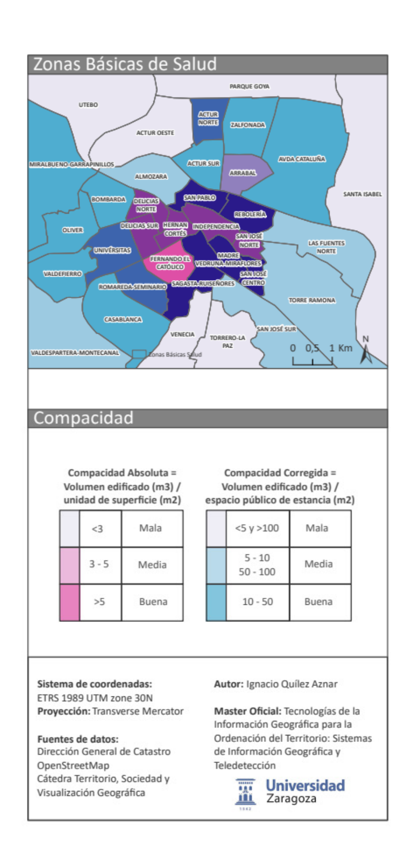


Figura 2. Compacidad Absoluta y Corregida en Zaragoza.

4.1.2. Complejidad

Las Zonas Básicas de Salud (ZBS) de Casablanca, San Pablo, Independencia, Madre Vedruna – Miraflores, Sagasta – Ruiseñores presentan las complejidades medias más elevadas, excediendo el valor de 0,9 y, por el contrario, algunas de las que señalan menor complejidad, con valores inferiores a 0,4 son Torrero – La Paz, Las Fuentes Norte y Valdespartera – Montecanal. Esta categorización por ZBS resume de manera representativa la complejidad real de cada área urbana, sin embargo, la representación por manzanas es la más confiable, permitiendo discernir dentro de cada ZBS las manzanas más y menos complejas.

Complejidad en Zaragoza

Manzanas

Complejidad
0 - 0,43
0,43 - 1,08
1,08 - 2,68

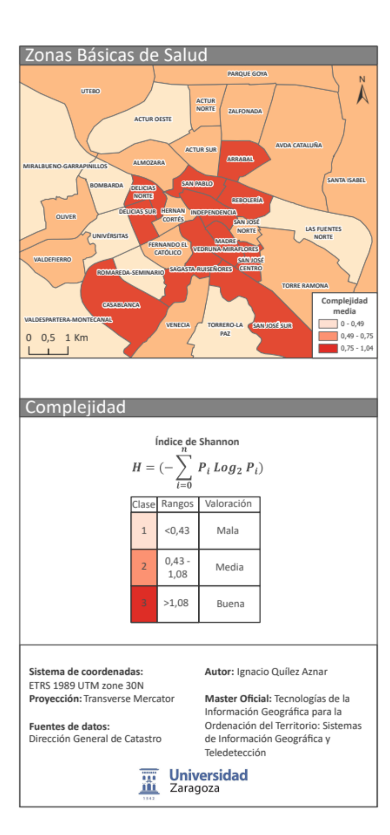


Figura 3. Complejidad en Zaragoza.

4.1.3. Accesibilidad

El resultado para el conjunto de ciudadanos de Zaragoza es positivo porque el 92 % se localizan en áreas de servicio de 15 minutos, este porcentaje disminuye hasta el 80% si se reduce el tiempo máximo de desplazamiento a 10 minutos y finalmente, en las áreas con mejor accesibilidad, puesto que desde ellas se tiene acceso a todas las clases de equipamientos en un máximo de 5 minutos, vive el 22 % de la población de la capital aragonesa (Figura 4).

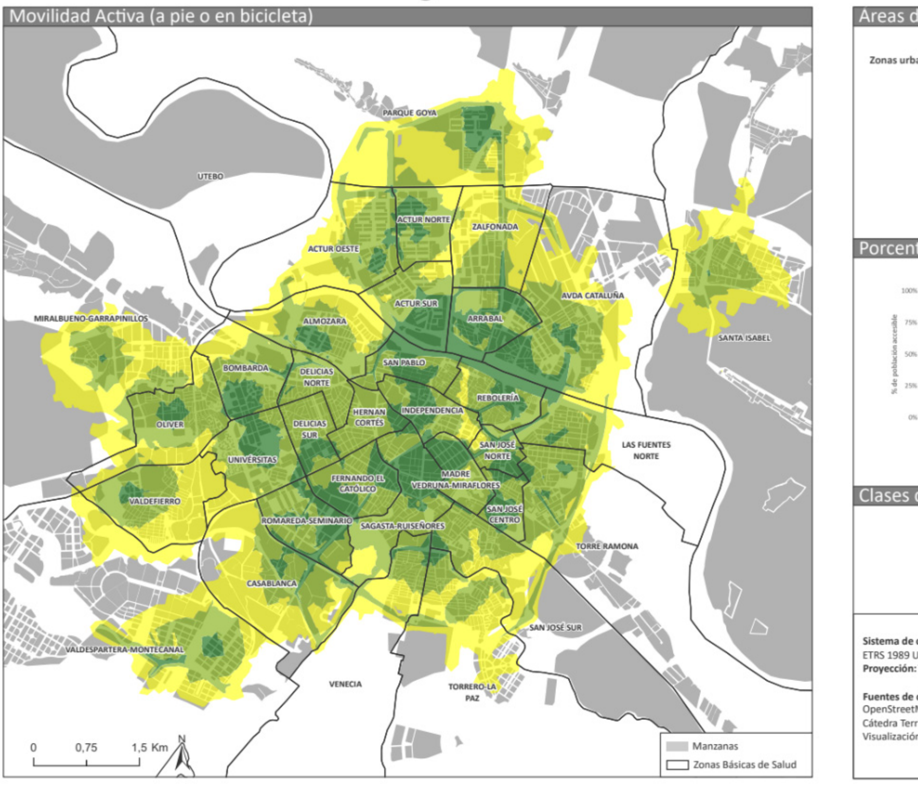
4.1.4. La Ciudad de los 15 minutos en Zaragoza

En este mapa se constatan los resultados observados en los anteriores indicadores, al mostrar Zaragoza mejores valores de la ciudad de 15 minutos en las áreas urbanas centrales como Independencia, San Pablo, Rebolería y Arrabal, además de secciones urbanas desconectadas como en Actur, San José Norte y Fernando el Católico (Figura 5).

El porcentaje para las valoraciones inferiores a 6 representan al 42 % de la población, mientras que, en la situación contraria, es decir, la población que vive en áreas con valoraciones comprendidas entre 6 y 27 significan el 28%, así pues, tal y como muestran los diferentes gráficos para las ZBS existen importantes diferencias entre las áreas de Zaragoza.

4.1.5. Participación ciudadana – Mapas Colaborativos

Analizados los datos que presentan los mapas colaborativos, se constata el hecho de que la mayor parte de los encuestados se corresponde con estudiantes universitarios de la facultad de educación, lo que explica de alguna manera que la principal demanda sea la de establecimientos para la compra de ropa seguida de la alimentación y bibliotecas y que las zonas más interesantes para cambiarse de domicilio se localicen próximas al campus universitario de San Francisco. Con ello, se confirma la necesidad de tomar los datos con cautela y no sacar conclusiones fehacientes precipitadamente, para lo cual resulta interesante estudiar a la población encuestada.



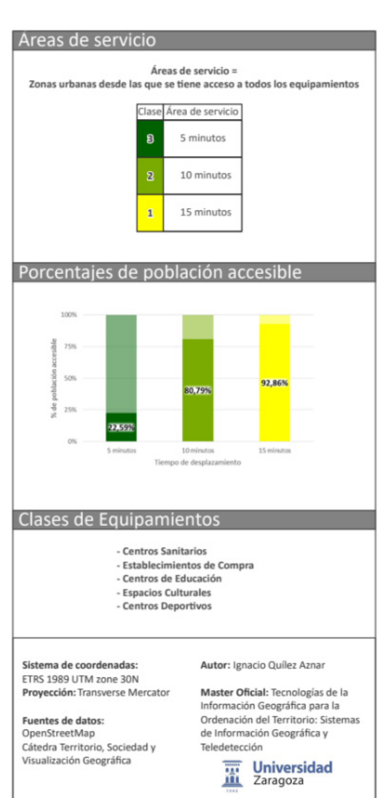


Figura 4. Accesibilidad General en Zaragoza.



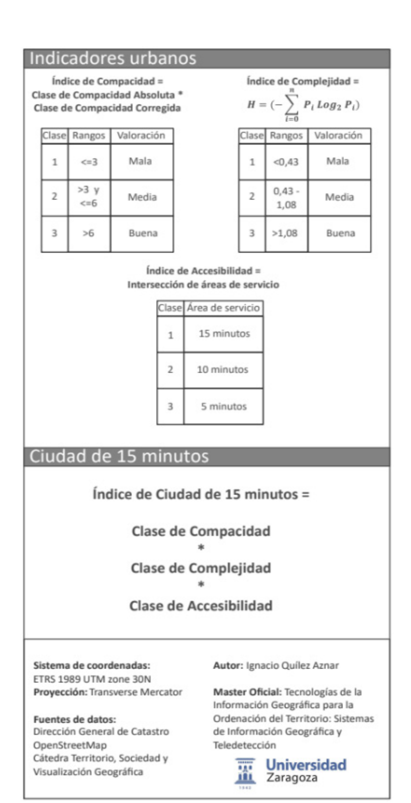


Figura 5. La Zaragoza de 15 minutos.

Sin embargo, cabe destacar la similitud de los resultados con el mapa "La Zaragoza de 15 minutos", al coincidir las zonas más demandas para mudarse con las áreas urbanas con mejores resultados bajo ese índice de Ciudad de 15 minutos.

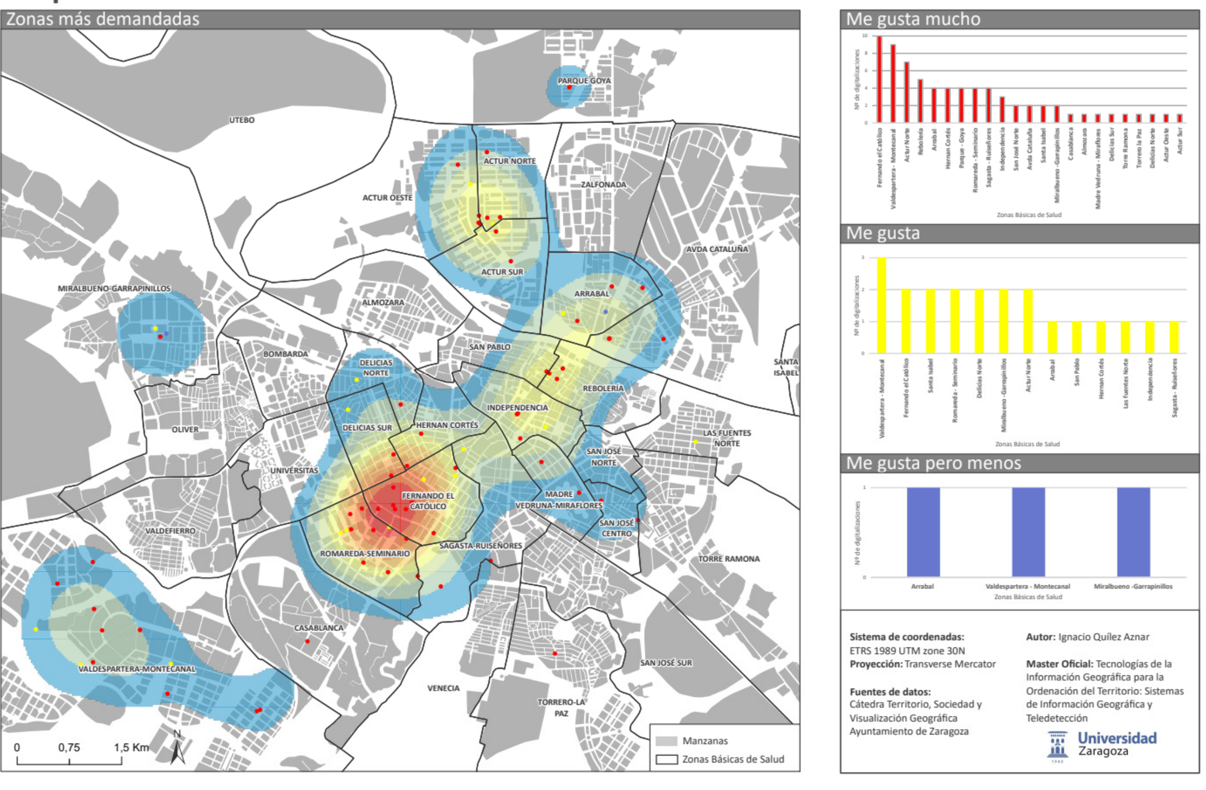


Figura 6. Mapa Colaborativo "Me Cambio de Casa".

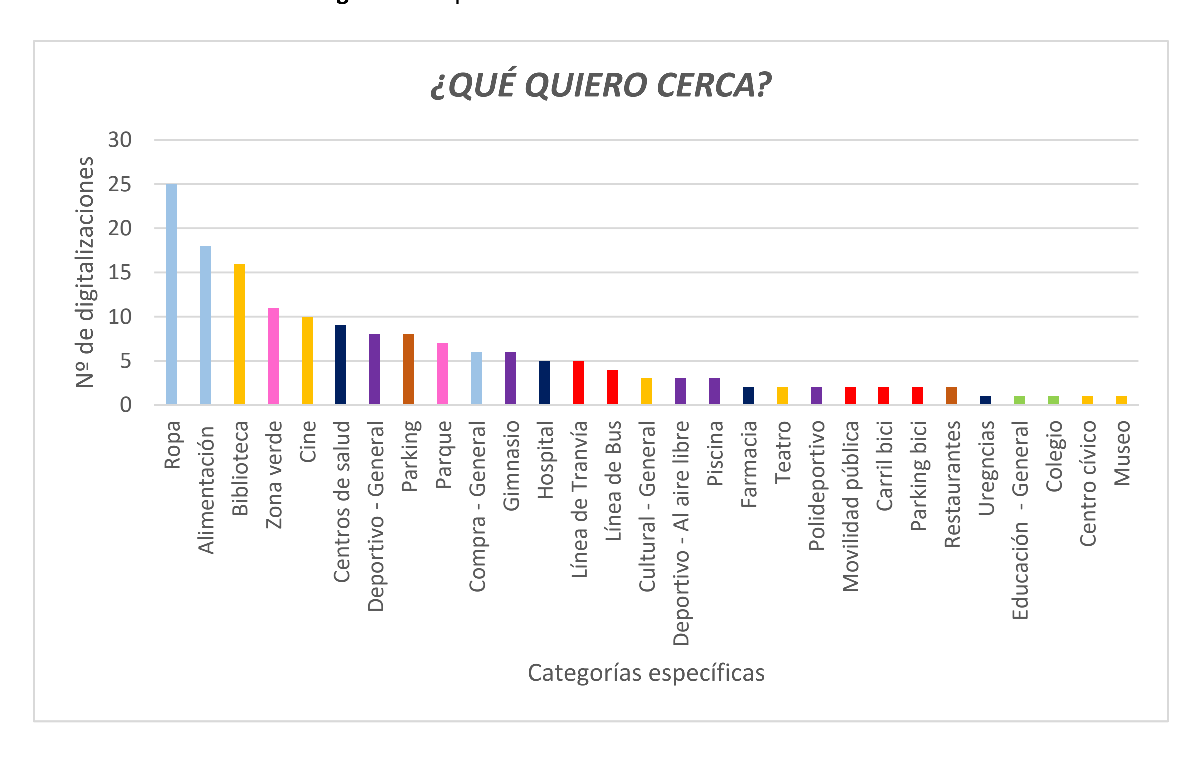


Figura 7. Principales demandas de las personas encuestadas.

5. DISCUSIÓN

Como justifica el apartado de metodología y constatan los resultados, la naturaleza de este trabajo es eminentemente geográfica, donde la escala de análisis supone una cuestión fundamental a la hora de obtener y representar los datos.

En consecuencia, la escala de trabajo ha sido la más precisa metodológicamente accesible y abarcable, representando por manzanas, secciones censales o Zonas Básicas de Salud, en función de la condición de cada indicador.

De acuerdo con esta cuestión de escala, han surgido varias limitaciones que han impedido una representación homogénea de los diferentes indicadores. Esta limitación se ha encontrado principalmente en el indicador de complejidad, dado que éste es calculado a partir de los inmuebles de cada manzana, además, durante el tratamiento de los datos, se ha percibido una falta de calificación de múltiples inmuebles.

Otra cuestión a tener en cuenta, es el grado de agregación con el que se calcula el indicador de compacidad absoluta, puesto que se están relacionando unidades administrativas con variaciones de superficie, pudiendo solventar esta “restricción” metodológica a partir de una malla ráster.

También para la compacidad corregida se ha hallado otro límite metodológico, a causa de la inexistencia de capas públicas (aportadas por Infraestructuras de Datos Espaciales) como la anchura de calles, lo que ha exigido una valiosa digitalización de aquellos espacios que OpenStreetMap califica de cierta manera como calles peatonales. Esta ausencia de capas ha supuesto también otra limitación para los análisis de accesibilidad, calculando dicho indicador con las líneas identificadas como *highway* por OpenStreetMap.

Este modelo cronourbanista que definirá la ciudad de París durante los próximos años, resulta muy atractivo para otras ciudades por dar respuesta a muchos de los objetivos y propuestas planteados por los ODS o la Nueva Agenda Urbana de Hábitat III.

No obstante, es muy interesante la reflexión que hace Pedro B. Ortiz sobre la “pérdida de competitividad internacional y capacidad de economía de escala” que podría acarrear el resquebrajamiento de la ciudad en pequeñas urbes de 15 minutos. Además, es imprescindible considerar la dinámica social, dado que no todas las divisiones de 15 minutos de una ciudad cuentan en la actualidad con los mismos servicios como demuestra este trabajo. Estas diferencias físicas se pueden trasladar al ámbito humano en forma de injusticias sociales.

Por todo esto, la ciudad de 15 minutos deberá ser analizada desde un punto de vista interdisciplinar, debido a las numerosas implicaciones que supone.

6. CONCLUSIONES

Zaragoza todavía no es una ciudad de 15 minutos, ya que como se ha demostrado con los indicadores, existen diferencias entre sus áreas urbanas, aunque los tres coinciden en el centro de Zaragoza con los mejores resultados.

Además, son muy interesantes las técnicas de participación ciudadana que representan los mapas colaborativos, ya que pueden ayudar a conocer las necesidades de los ciudadanos de forma concreta y en un primer tratamiento de sus datos, han demostrado generar valiosos resultados. Por ello sería conveniente ampliar y mejorar la metodología de recabado de datos para que la voluntad de los ciudadanos forme parte de la toma de las decisiones urbanas.

Cabe destacar el potencial de este trabajo como verdadera herramienta de urbanismo, para lo cual es necesario cruzar la información con datos sociodemográficos y así obtener una rica base de datos para el urbanismo táctico.

En síntesis, las principales aportaciones de este trabajo son:

- Análisis de gran relevancia en el contexto urbano actual.
- Primera aplicación de esta metodología al caso de Zaragoza.
- Capacidad de ser replicado en otras ciudades.
- Cartografía como principal herramienta de visualización ciudadana.

Puesto que vivimos en un mundo de pantallas, con una sociedad que prima la inmediatez del conocimiento, se ha creado el siguiente StoryMap (https://arcg.is/G0LGu) que resume y facilita el entendimiento del presente trabajo, acercando la información a la ciudadanía de una manera visual e intuitiva.

7. BIBLIOGRAFÍA

Bustos, M. (2015). Análisis de la complejidad urbana en la ciudad turística: El caso de La Pineda (Vila-seca, Tarragona). *International Conference on Regional Science: Innovation and geographical spillovers: New approaches and evidence*.

Chaire Entrepreneuriat Territoire Innovation. (2020) Qui Somme-nous? https://chaire-eti.org/la-chaire/

CICIM oficial (2020). Carlos Moreno: La Ciudad de los 15 minutos (Smart Cities). https://www.youtube.com/watch?v=hmlAnYm74n8&t=1300s

Escolano, S. (2018). Los espacios urbanos: procesos y organización territorial. Zaragoza: Universidad de Zaragoza. Recuperado de https://geografia.unizar.es/sites/geografia.unizar.es/files/archivos/Documentos/sescolano_urbana_tema_2.pdf

ETSAM [Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (UPM)]. (7 de julio de 2021). 15-Minute City and Health [Archivo de Vídeo]. YouTube https://www.youtube.com/watch?v=S5hNJ_HyRZ4

Flanagin, A. J. y Metzger, M. J. (2008). The credibility of volunteered geographic information. *GeoJournal*, 72(3-4), 137-148.

Jacobs, J. (2020). *Muerte y vida de las grandes ciudades*. Capitán Swing Libros.

LA Network. (2020). Ciudad de los 15 minutos: ¿en qué consiste la propuesta de Anne Hidalgo para su segundo mandato. https://la.network/ciudad-de-los-15-minutos-en-que-consiste-la-propuesta-de-anne-hidalgo-para-su-segundo-mandato/

Luis Buezo. (3 de octubre de 2020). La Ciudad de los 15 minutos VS La Metrópoli de 30 minutos – Entrevista a Pedro Ortiz. [Archivo de Vídeo]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=2MvDSUt9B3Y&t=3s

Mardones-Fernández-de-Valderrama, N., Luque-Valdivia, J. y Aseguinolaza-Braga, I. (2020). La ciudad del cuarto de hora, ¿una solución sostenible para la ciudad post-COVID-19?. *Ciudad y Territorio, Estudios Territoriales*, 52(205), 653-664. https://doi.org/10.37230/CyTET.2020.205.13.1

Marín-Cots, P. y Palomares-Pastor, M. En un entorno de 15 minutos. Hacia la Ciudad de Proximidad, y su relación con el Covid-19 y la Crisis Climática: el caso de Málaga. Ciudad y Territorio, Estudios Territoriales, 52(205), 687-700. https://doi.org/10.37230/CyTET.2020.205.13.3

Rubiales, M. (2019) Ciudades del Futuro. [Podcast] No es un día cualquiera. Radio Nacional España

Rueda, S. (2010). Plan de indicadores de sostenibilidad urbana de Vitoria-Gasteiz. Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, Ayuntamiento Vitoria Gasteiz.

Sanz, A. (1997). Movilidad y accesibilidad: un escollo para la sostenibilidad urbana. Construcción de la Ciudad Sostenible, Documentos. Recuperado de http://habitat.aq.upm.es/cs/p3/a013.html



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 543-552

Análisis de la distribución geográfica de la pandemia COVID-19 en Palma (Mallorca, Illes Balears)

M. Ruiz-Pérez[1,2,3], A. Colom Fernández[2], A. Moragues-Pascual[1], J. Mª. Seguí-Pons[3], J. Muncunill Farreny[2], J.A. Pou Goyanes[2]

[1] *Servei de SIG i Teledetecció, Universitat de les Illes Balears. Cra. Valldemossa Km. 7,5, 07122 Palma.*
[2] *Institut d'Investigació Sanitària. Illes Ballears. Hospital Son Espases.07120. Palma.*
[3] *Departament de Geografia. Universitat de les Illes Balears. Cra. Valldemossa Km. 7,5, 07122 Palma*

maurici.ruiz@uib.es, antonio.colom@ssib.es, alexandre.moragues1@estudiant.uib.cat, joana.segui-pons@uib.es, josep.muncunill@ssib.es, joana.pou@ssib.es

RESUMEN: Se analiza la distribución espacial de la tasa de infección por COVID-19 en la ciudad de Palma (Illes Balears) a partir de la geolocalización de los casos positivos por distritos censales y se evalúa su relación con variables socioeconómicas. Los datos sobre infecciones han sido proporcionados por la Plataforma de Investigación en Información en Salud (PRISIB) y el Servicio de Salud de la Conselleria de Salud y Consumo del Govern de las Illes Balears. Los datos socioeconómicos provienen del Atlas de Distribución de Renta de los Hogares del Instituto Nacional de Estadística. El estudio combina varios métodos de análisis: la autocorrelación espacial global y local para la identificación y caracterización de los patrones en la concentración geográfica de casos; el cálculo del índice de Gini para el análisis de equidad en la distribución geográfica de la infección y la regresión lineal generalizada (Gaussiana) para el desarrollo de un modelo explicativo de la distribución geográfica de los casos positivos en relación con variables socioeconómicas. Los resultados muestran que la pandemia experimentó cinco olas en el período marzo2020-marzo 2022, que corresponden a los meses de: abril 2020, agosto 2020, diciembre 2020, julio 2021 y enero de 2022. Cada ola muestra un patrón geográfico de distribución particular, si bien la segunda y tercera ola son las que muestran mayores niveles de concentración de infectados. En este sentido destaca especialmente la segunda ola que afecta notablemente a los barrios periféricos del levante de la ciudad (Estadi Balear, Son Gotleu, Soletat, Pere Garau). El índice Gini constata los desequilibrios geográficos en la distribución de infectados en las primeras olas de la pandemia. Además, el modelo de regresión muestra que las variables socioeconómicas más significativas en la predicción de la infección Covid-19 son: la renta media, el porcentaje de menores de 18 años, el tamaño medio del hogar y el porcentaje de hogares unipersonales. El estudio evidencia que los desequilibrios económicos de la ciudad han tenido una clara influencia en el patrón espacial de la distribución de la pandemia.

Palabras-clave: COVID-19, inequidad espacial, autocorrelación espacial, índice Gini, Palma

1. INTRODUCCIÓN

La tasas de infección y mortalidad del virus SARS-CoV-2 muestra patrones espaciales muy diversos que podrían guardar relación con la configuración socioeconómica de los territorios afectados (Marí-Dell'olmo et al., 2021). Se ha constatado que el estado de salud de las personas depende en gran parte de sus condiciones socioeconómicas (Duque et al., 2021), por ello, puede plantearse la hipótesis de que las tasas de infección COVID-19 podría ser mayores en poblaciones desfavorecidas (Oronce et al., 2020). A este respecto, el estudio de las relaciones entre aspectos socioeconómicos y el grado de infección o mortalidad por COVID es un tema que preocupa a la comunidad científica. De hecho, es común el uso de métodos de análisis económico como las curvas de Lorenz y el cálculo de coeficientes Gini para evaluar los desequilibrios en la distribución de casos (infecciones, decesos, etc.) en relación al nivel de renta u otras variables socioeconómicas (Garcia-Morata et al., 2022; Lindström, 2020). También cabe destacar que en la investigación epidemiológica COVID se hace uso profuso de las tecnologías de la información geográfica (Kamel Boulos & Geraghty, 2020).

El estudio de brotes epidémicos en entornos confinados ayuda a analizar el efecto de estrategias de intervención de aislamiento, como las cuarentenas u otras acciones mitigatorias. En este sentido los entornos insulares suelen ser escogidos como laboratorios de confinamiento para el estudio de enfermedades. Por

ello, la ciudad de Palma (Illes Balears, España) constituye un ámbito geográfico adecuado para el estudio epidemiológico de la distribución geográfica de los infectados Covid-19. Palma es la capital de la isla de Mallorca, una isla de tamaño medio que por su carácter insular un de confinamiento geográfico evidente. La ciudad cuenta con un total de 419.366 habitantes (IBESTAT, 2021) y se ubica en el municipio del mismo nombre de 208,63 Km^2. El grado de aislamiento de la ciudad durante el estado de alarma (BOE, 2020) fue extremo por lo que constituye un laboratorio epidemiológico singular. Además, Palma cuenta con información demográfica y socioeconómica accesible de secciones censales del municipio, lo que permite un análisis socioeconómico integrado de la infección por COVID-19.

El objetivo que se propone este estudio es evaluar las relaciones entre la distribución geográfica de los casos de infección COVID-19 en Palma durante el periodo marzo 2020 a marzo 2022 y diversas variables socioeconómicas.

2. METODOLOGÍA

2.1. Fuentes de datos

La georreferenciación de positivos Covid-19 fue realizada a partir de un proceso de anomimización de expedientes sanitarios. Esta tarea se realizó gracias a la transferencia de los resultados del proyecto de investigación “Sistema de Información Geográfica anonimizado para dar soporte a la lucha contra la pandemia COVID-19 a nivel municipal” (Ruiz Pérez, M., Colom Fernández, 2020). Este sistema de anonimización elimina las referencias geográficas de los registros de positivos COVID referidos a su dirección postal o coordenadas geográficas y la sustituye por un código de municipio, sección censal, barrio o manzana padronal. El trabajo fue realizado por la Plataforma de Investigación en Información en Salud (PRISIB) dependiente del Institut d’Investigació Sanitària de les Illes Balears y la Consejería de Salud del Gobierno de las Islas Baleares. Del conjunto de información sobre casos COVID-19 proporcionados por la PRISIB se seleccionaron únicamente los casos positivos únicos por persona para el período marzo 2020 – marzo 2022. La figura 1 muestra la distribución geográfica de las tasas de infección totales (nº de infectados/100 mil habitantes) para todo el periodo estudiado (marzo 2020-abril 2022).

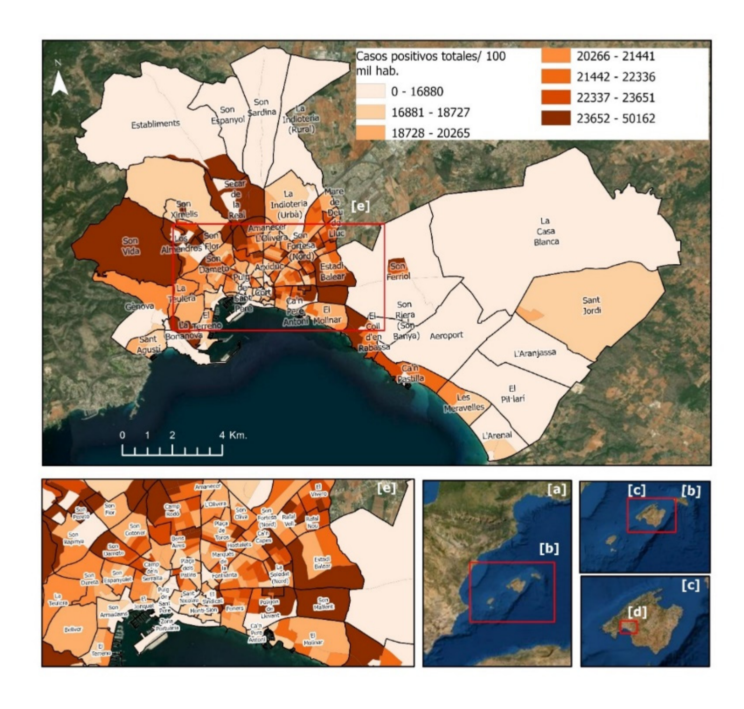


Figura 1. [a] Localización de Baleares en cuenca Mediterránea Occidental, [b] Localización de Mallorca en el archipiélago Balear, [c] Localización del municipio de Palma en la isla de Mallorca, [d] Casos totales positivos Covid-19 por 100 mil habitantes en secciones censales de Palma para el período Marzo 2020-Marzo 2022 (quintiles), [e] Detalle mapa (d) del centro de Palma.

Para el análisis de las relaciones entre de la distribución geográfica de positivos COVID-19 y las variables socioeconómicas se han utilizado los indicadores recogidos en el Atlas de Distribución de Renta de los Hogares 2019 elaborado por el Instituto Nacional de Estadística entre las que se incluyen: nivel de renta

(bruta y neta), tasa de desempleo, densidad de población, tamaño medio del hogar, porcentaje de jóvenes, porcentaje de ancianos.

2.2. Procesos analíticos desarrollados

Para el análisis de la distribución geográfica de los positivos COVID se hizo uso de funciones de estadística espacial de los programas ArcGIS Pro 2.8 y Geoda 1.2. En concreto se evaluó la autocorrelación espacial global y local de la distribución de las tasas de positividad COVID-19 por cada ola a nivel de sección censal.

Los índices de Moran Global y Local (LISA) son uno de los indicadores más utilizados para el análisis de patrones espaciotemporales en el ámbito epidemiológico y que está siendo utilizado con profusión en el análisis de la distribución del COVID-19 (Siljander et al., 2022) El índice global de Moran es utilizado para el análisis de la autocorrelación espacial. Fue desarrollado por Alfred Pierce Moran (Anselin, 2003). Es un estadístico que analiza de forma integral las variaciones de autocorrelación espacial entre valores vecinos cercanos. El índice puede obtener valores entre +1 y -1. Cuando 1 indica una autocorrelación positiva perfecta, 0 una distribución aleatoria y -1 una autocorrelación negativa perfecta. La siguiente expresión muestra su fórmula:

$$I = \frac{N}{W} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

siendo N: número de unidades geográficas, W número de unidades vecinas, $W = \sum_i \sum_j W_{ij}$wij: matriz de distancias entre áreas geográficas

El índice de Moran se ayuda por una prueba de significación estadística de valores Z, suponiendo una distribución normal de los residuos.

El índice de Moran Local o Índice de Asociación (LISA) fue desarrollado con el objetivo de identificar agrupaciones locales y valores atípicos espaciales locales. Permite la identificación de patrones locales de asociación espacial. Básicamente despliega el índice Moran Global a nivel geográfico y evalúa la influencia de ubicaciones individuales en la estadística global. Este índice permite la identificación de valores de agrupamiento (*hot spots*). Nos proporciona una medida del nivel de agrupamiento en relación con los valores localizados junto a una observación. Permite conocer la contribución de cada unidad de análisis a la variación global.

Para el análisis de equidad en la distribución geográfica de los positivos Covid-19 se ha utilizado la autocorrelación espacial bivariada, la curva de Lorenz y el índice Gini.

El índice de Moran Bivariado global y local nos permite conocer la variación de un fenómeno en el espacio geográfico considerando las afecciones que dicho fenómeno representa en relación a los cambios experimentados por otra variable (2).

$$I = \frac{N}{W} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

siendo x: variable 1; y: variable 2; W matriz de distancia entre unidades

El índice presenta gran utilidad para detectar la vinculación en los patrones de distribución de dos variables de forma conjunta.

La curva de Lorenz es una representación gráfica que muestra la distribución relativa de una variable en relación con otra. El eje horizontal representa el porcentaje acumulado de una variable y el eje vertical el porcentaje acumulado de otra. La curva parte del origen (0,0) y termina en su punto (1,1). En el caso de una distribución equitativa de un recurso, se dibujaría una línea perfecta de 45 grados. De lo contrario habrá una desviación de la curva hacia su interior. La diferencia del área generada entre las curvas (real e ideal) y el eje x mostrará el grado de inequidad en la distribución del recurso. En este caso, el recurso es la tasa de positividad COVID-19, de forma que, a mayor alejamiento de la curva, mayor inequidad en la distribución geográfica de la pandemia. Es decir, su distribución no será uniforme.

El coeficiente GINI mide el grado de desigualdad en la distribución de una variable respecto a otra (Kalmijn, 2014). Evalúa el grado de concentración de una variable en la distribución geográfica de sus elementos. Básicamente, compara la curva de Lorenz obtenida con una distribución empírica perfecta y la curva empíricamente construida con valores de la variable. Expresa la proporción del área cerrada por el triángulo definido por la línea de igualdad perfecta y la línea de la desigualdad perfecta. Su valor oscila entre 0 y 1. Cuanto mayor sea, mayor será la desigualdad en la distribución. (3)

$$G = 1 - \sum_{i=1}^{N} (\sigma Y_{y-1})(\sigma X_{i-1} - \sigma X_i) \quad (3)$$

donde σX i Σy son porcentajes acumulados de las variables X e Y, N es el número de observaciones (unidades geográficas).

El uso del coeficiente Gini es habitual en estudios epidemiológicos de asociación de niveles bajos de renta y niveles de muertes o infecciones.

Con objeto de constatar la posible dependencia del número de infectados COVID-19 en relación a las variables socioeconómicas consideradas, se ha testeado un modelo de regresión lineal generalizada ordinaria utilizando un modelo de distribución continuo (Gaussiano). El modelo sería similar a una regresión de mínimos cuadrados (OLS). El modelo de regresión lineal generalizado consiste en una regresión lineal ordinaria que permite que las variables de respuesta tengan modelos de distribución de errores distintos de una distribución normal. Tiene tres componentes básicos: componente aleatoria (identifica la variable respuesta), una componente sistemática (especifica las variables explicativas) y una función link (es una función del valor esperado de Y, como una combinación lineal de las variables predictoras.

$$E(Y) = \mu = g^{-1} g(X, \beta) \quad (4)$$

donde E(Y) es el valor esperado de Y; Xβ es el predictor lineal, una combinación lineal de parámetros desconocidos β, g es la función de enlace

En el modelo desarrollado, como variable dependiente se utiliza el número de casos positivos Covid-19 por 100 mil habitantes para la segunda ola y como covariables se incluyen las variables socioeconómicas recogidas del Atlas de distribución de la renta de los Hogares del INE para el 2018.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La base de datos construida con los casos positivos COVID-19 en la ciudad Palma para el periodo marzo-2020 / marzo 2022 muestra un total de 85.341 casos. La distribución temporal de positivos COVID-19 por meses permite identificar cinco pequeñas cumbres, a las que haremos referencia como olas de infección (Tabla 1). Se ha hecho corresponder cada ola de infección con un mes, por lo que las olas detectadas no se corresponden estrictamente a las especificadas por las autoridades sanitarias en las Islas Baleares. En la Figura 2, se observa que se ha producido incremento progresivo en el número de infectados para las distintas olas. La primera corresponde al mes de abril de 2020 (441 positivos) y fue la de menor magnitud y coincidió con la fase de confinamiento. La última ola de infección se produce en el mes de enero de 2022 (29.963 infectados) y es cuando se producen las mayores tasas de infección.

La distribución geográfica de los casos positivos COVID-19 por sección censal para las distintas olas se observa en la Figura 3. Se evidencia que cada ola tiene un modelo de distribución particular si bien el análisis de concentración espacial de casos, mediante el cálculo del coeficiente Morans Global, nos indica que los datos de la primera ola (abril 2020) y de la última (enero 2022) muestran escaso nivel de significación. La mayor concentración de casos positivos COVID-19 se presenta en la segunda ola (agosto 2020) con un índice Moran de 0,16.

Tabla 1. Autocorrelación espacial de la distribución geográfica de positivos COVID-19 por olas

Ola	*Mes*	*Coeficiente Gini*	*Autocorrelación Espacial (Índice Morans) significación=0.05*	*p-value*	*z-score*
Ola 1	Abril 2020	0,64	-0,01	0,61	-0,50
Ola 2	Agosto 2020	0,30	0,16	0,00	10,55
Ola 3	Diciembre 2020	0,27	0,06	0,00	4,13
Ola 4	Julio 2021	0,24	0,04	0,00	2,87
Ola 5	Enero 2022	0,16	0,00	0,74	0,32

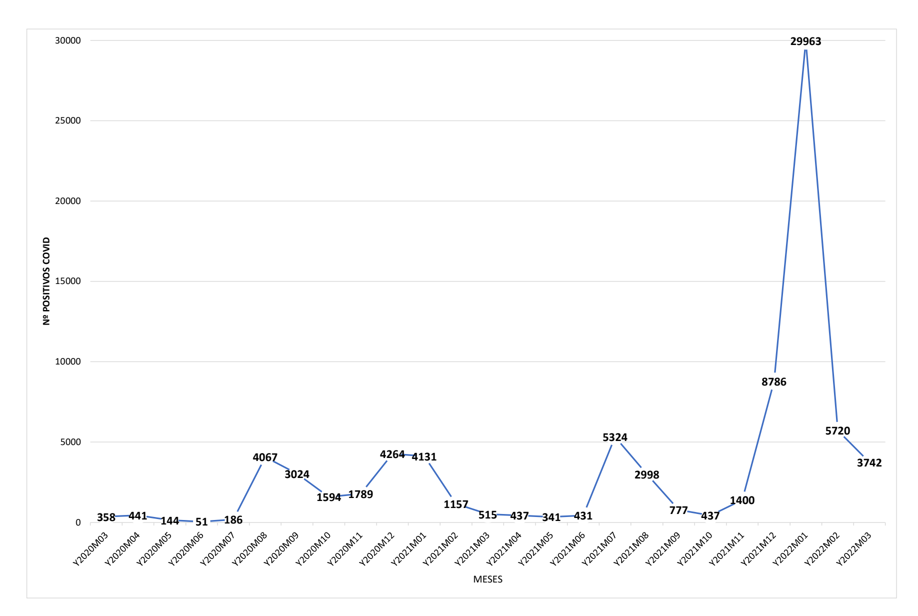


Figura 2. Evolución mensual de casos positivos COVID 19 en la ciudad de Palma desde marzo 2020 a marzo 2022.

La cartografía de clusters de outliers del índice Local de Morans constata pautas de agrupamiento específicas para las distintas olas de infección (Figura 4). En la primera ola (abril 2020) aparece una concentración de casos positivos en secciones censales de la periferia de la ciudad, en las que se ubican residencias de ancianos y hospitales. Este hecho confirma el hecho de que la mayoría de infecciones iniciales de COVID-19 fueron en personas mayores. La segunda ola (agosto 2020) muestra una zonificación bipolar de la ciudad, en la que los casos positivos se agrupan mayoritariamente en la zona este, mientras que en la zona de poniente se dan los valores más bajos. La tercera ola (diciembre 2020) repite un patrón algo similar a la segunda ola, sin embargo, los casos positivos se extienden más por la zona del ensanche poniente y Norte de Palma.

La cuarta ola (julio 2021) es poco significativa en cuanto a su patrón geográfico, se observa escasa concentración. Sin embargo, la quinta ola (enero 2022) el patrón es bastante similar a de la tercera, aunque en este caso el número de infectados es mucho mayor. El análisis integral de la distribución de casos para todo el periodo de estudio vuelve a mostrar la concentración de positivos en la zona del levante de la ciudad (Figura 4, f).

Con objeto de ampliar el estudio del patrón de concentración geográfica de casos positivos de COVID-19 nos centraremos en el estudio de la segunda ola. Así, el análisis de autocorrelación espacial local bivariada entre casos Covid-19 de la segunda ola y el nivel de renta bruta de la población se presenta en la figura 5. Se constata la concentración de valores altos de infección y bajos de renta (HIGH-LOW) en la zona este de la ciudad, mientras gran parte de la zona oeste presenta una concentración baja de infecciones y alta en el nivel de renta (LOW-HIGH). El mapa dibuja claramente una brecha social en el levante de la ciudad con una autocorrelación significativa que demuestra una clara inequidad en la distribución geográfica de la pandemia afectando de forma más intensa a los barrios menos favorecidos.

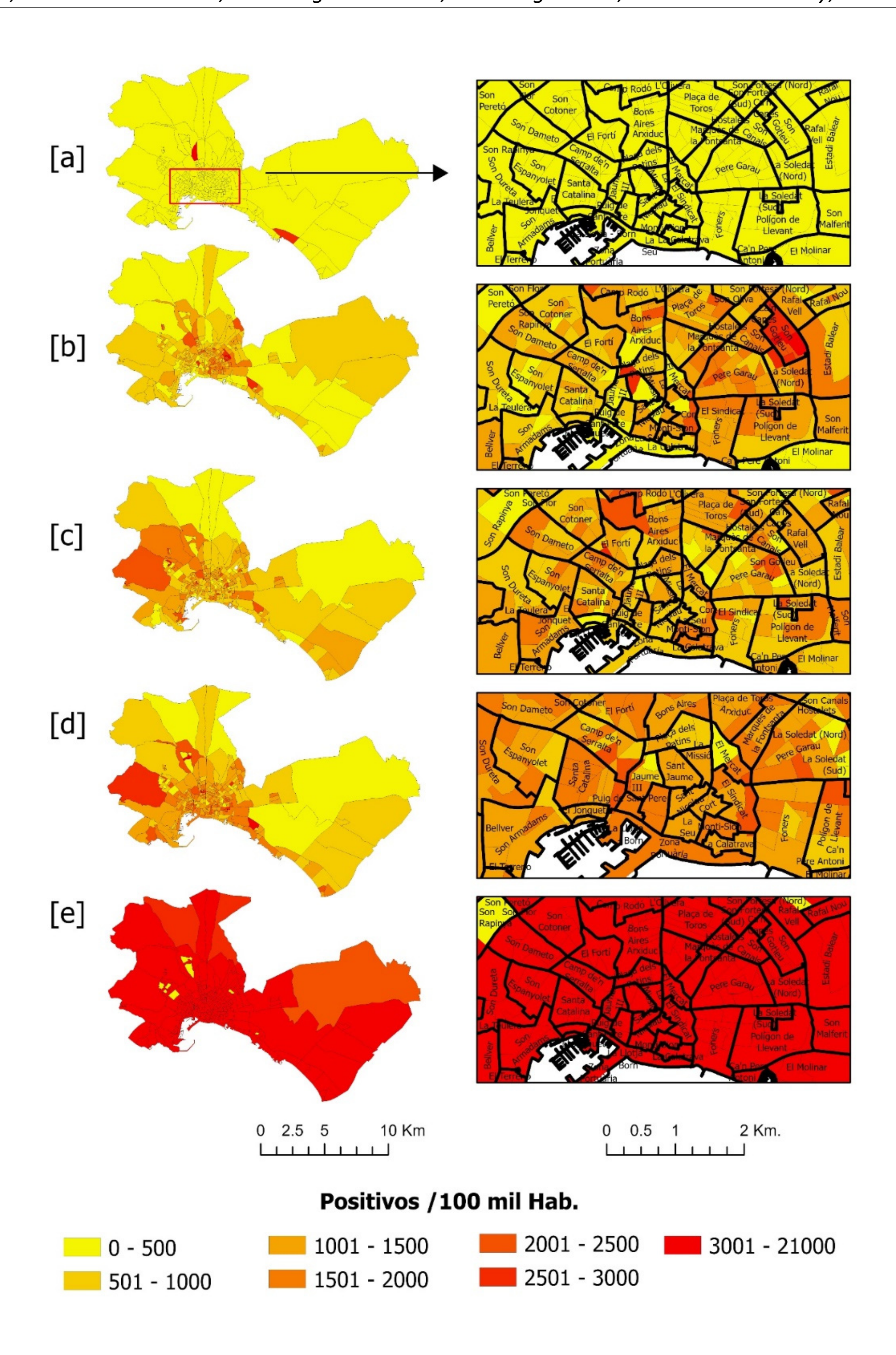


Figura 3. Distribución de casos positivos COVID 19 por cien mil habitantes por olas [a] abril 2020, [b] agosto 2020, [c] diciembre 2020, [d] julio 2021, [e] enero 2022 y total acumulado [f].

Otros valores de coeficientes Moran local bivariado para los casos positivos Covid de la segunda ola con diversas variables socioeconómicas muestran también clara concentración de la zona este de la ciudad: valores -0,195 para la edad media, 0.272 para el tamaño del hogar. Por tanto, se confirma que se han diagnosticado mayor número de positivos en secciones censales con valores elevados de jóvenes y con hogares con muchos miembros.

El análisis de la curva de Lorenz (Figura 6) y el coeficiente Gini (Tabla 1) muestra que los mayores niveles de desequilibrio se produjeron en las primeras olas de la pandemia. Es decir, los estratos sociales más bajos de la población fueron a su vez los que padecieron más casos COVID-19. De esa forma, los valores más bajos de Gini se obtienen en las olas más recientes y que han supuesto una afectación generalizada a la población.

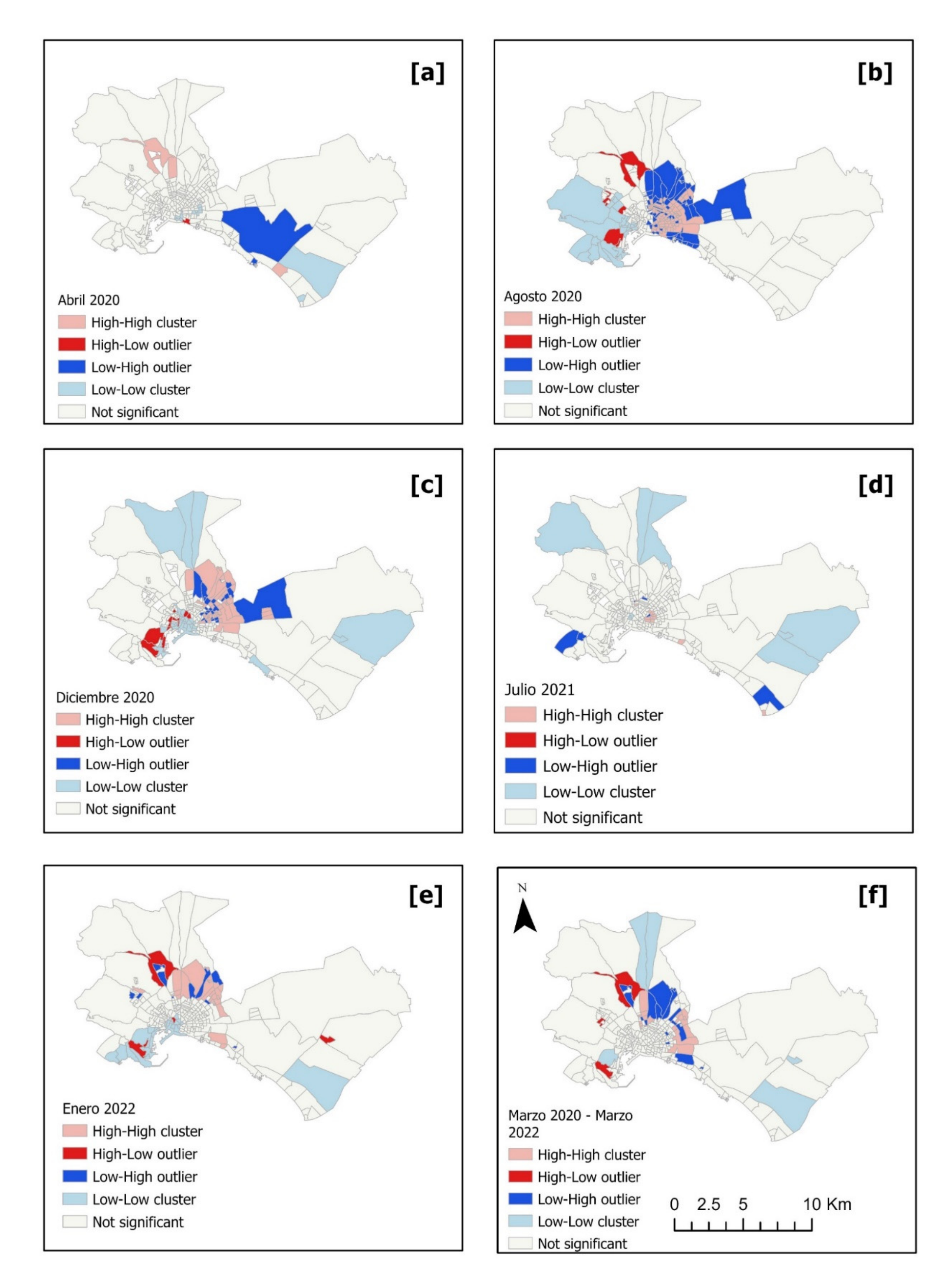


Figura 4. Cartografía de Clusters Outliers del índice local Morans: [a] primera ola, [b] segunda ola, [c] tercera ola, [d] cuarta ola, [e] quinta ola, [f] total infectados período marzo 2020/marzo 2022.

El análisis del modelo de regresión lineal generalizada (Tabla 2) presenta un valor R^2 relativamente bajo (0,284), aunque si muestra una dependencia del número de infectados COVID-19 con las siguientes variables: renta neta (signo negativo), tamaño del hogar, porcentaje de menores (signo negativo) y porcentaje de hogares unipersonales. Es decir, el número de infectados ha sido mayor en hogares con renta baja, mayores de edad, que viven en hogares unipersonales o poseen elevado número de miembros familiares. Es los hogares con rentas bajas y numerosos miembros familiares adultos han sido los más vulnerables.

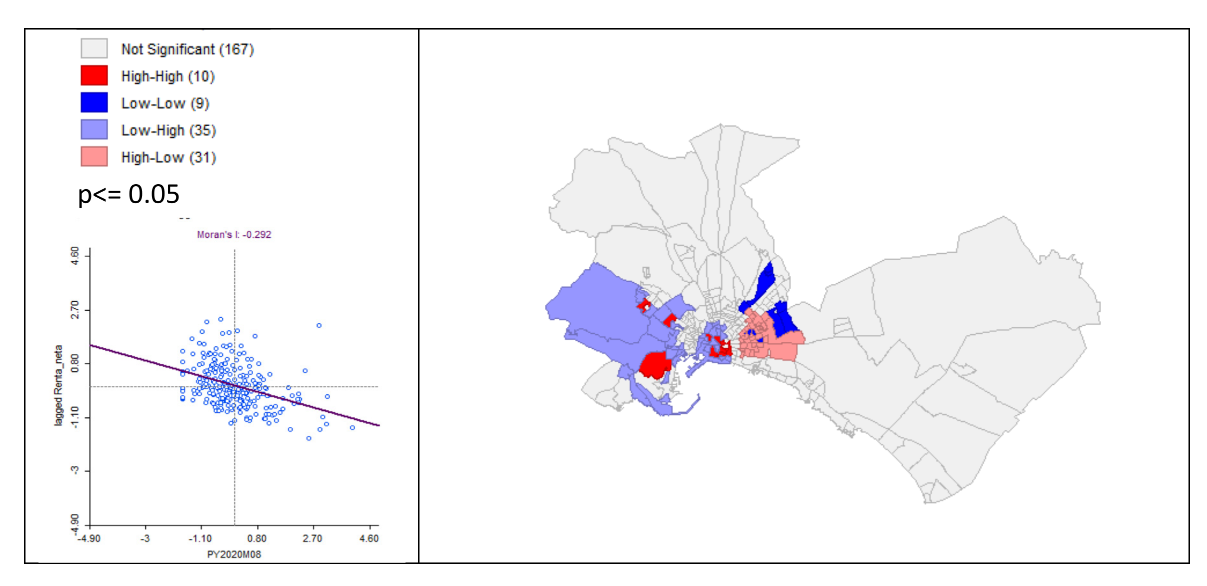


Figura 5. Coeficientes Moran Local Bivariado entre casos positivos Covid por 100 mil habitantes y nivel de renta neta/habitante por sección censal.

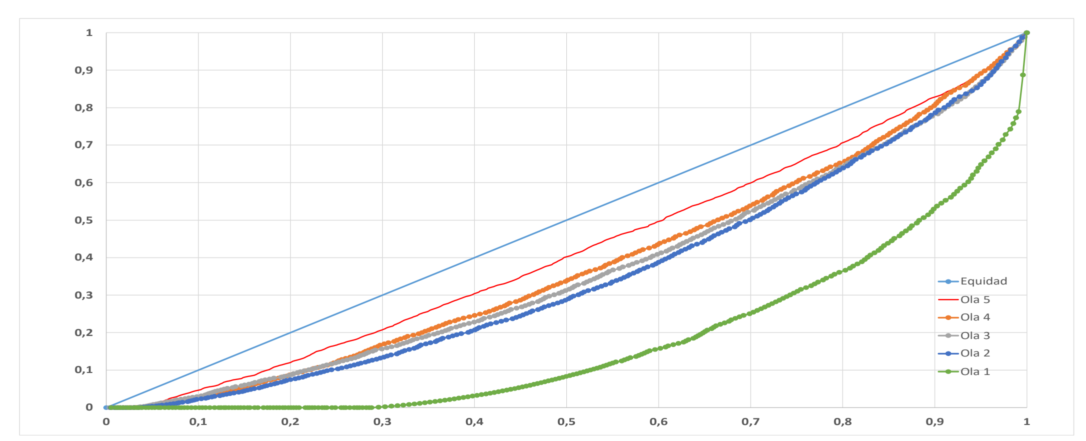


Figura 6. Curva de Lorenz de la distribución de positivos COVID por secciones censales (equidad horizontal).

En cuanto a limitaciones del estudio cabe mencionar dos cuestiones: en primer lugar el uso de unidades geográficas como las secciones censales, en el análisis epidemiológico, podría dar lugar a errores significativos en cuanto a interpretación de resultados y análisis de la relación de tasas de infección con otras variables Por ello algunos autores recomiendan hacer uso directo de datos puntuales georeferenciados (Garcia-Morata et al., 2022). En este estudio no ha sido posible el uso de datos puntuales de localización de positivos para garantizar la preservación del anonimato de los datos. En segundo término, para una interpretación correcta de resultados, habría que considerar que el acceso a los test de positividad COVID-19 podría presentar un sesgo geoeconómico de forma que los positivos podrían ser aquellos con mayor nivel económico que han tenido mayor oportunidad de hacerse más test de infección (Schmitt-Grohé et al., 2020). Ello podría suponer errores en las cifras reales de infectados y sobredimensionar barrios con elevado poder adquisitivo que han realizado mayor número de pruebas. En este caso, los contrastes y desequilibrios detectados podrían ser mucho mayores.

Finalmente hay que señalar que además de la inequidad social en la distribución de la pandemia, los efectos económicos del COVID-19 en Palma han sido devastadores por el hecho de afectar de forma directa a la actividad turística. La pandemia ha provocado una pérdida masiva de empleo turístico de forma generalizada (Sun et al., 2022) siendo más acusada en los sectores sociales de bajo nivel de rentas. Esta circunstancia todavía ha hecho que la brecha económica haya ahondado la brecha social y económica de la ciudad.

Tabla 2. Resultados de la regresión lineal generalizada (Gaussiana): [a] Estadísticos (*) significación > 0.05 [b] Sumario de coeficientes

[a] Estadísticos

Variables de entrada	*Tasas Covid _ Variables Socioeconómicas*	*Variable Dependiente*	*Tasa positivos Covid-19 (Agosto 2020, Segunda Ola)*
Número de observaciones	252	Akaike's Information Criterion (AICC)	3836,219
Multiple R-Squared	0,284	Ajusted R-Squared	0,273
Joint F-Statistic	24,597	Prob (>F), (4,247) degrees of freedom	0,000 (*)
Joint Wald Statistic	73,661	Prob.(>chi squared), (4) degrees of freedom	0,000 (*)
Koenker (BP) Statistic	8,338	Prob.(>chi squared), (4) degrees of freedom	0,078
Jarque-Bera_Statistic	49,101	Prob(>chi.squared), (2) degrees of freedom	0,000 (*)

[b] Sumario coeficientes del modelo Regresión Lineal logística (Gaussiana/OLS)

Variable	Coeficiente	Error estándar	t-Statistic	Probability	Robust SE	Robust t	Robust Pr	VIF
Intercept	-4411,807	1005,649	-4,387	0,000	1070,862	-4,119	0,000	---------
Renta media	-0,020	0,003	-6,198	0,000	0,003	-5,473	0,000	1,013
Porcentaje de menores de 18 años	-28,375	11,695	-2,426	0,015	12,015	-2,361	0,018	1,813
Tamaño medio del hogar	1918,704	276,111	6,949	0,000	282,012	6,803	,0,000	4,291
Porcentaje hogares unipersonales	51,199	10,765	7,755	0,000	11,719	4,368	0,000	4,100

4. CONCLUSIONES

La pandemia Covid-19 en la ciudad de Palma (Mallorca, Illes Balears) durante el periodo marzo-2020 / marzo 2022 muestra cinco olas de infección: abril 2020, agosto 2020, diciembre 2020, julio 2021, enero 2022. Cada ola presenta un modelo de distribución geográfica particular, si bien la segunda ola es la que presenta un modelo de concentración espacial más definido. A partir de la segunda ola, la infección se hace más generalizada desde el punto de vista territorial. El análisis de autocorrelación espacial muestra que los barrios periféricos de la zona Este de la ciudad son los que presentan mayor número de infecciones. Se trata de barrios con bajo nivel de renta y que muestran indicadores socioeconómicos de elevada privación social.

El índice Gini constata inequidad en la distribución de los infectados por la pandemia, especialmente en las primeras olas. La regresión lineal además, ha constatado la dependencia del número de infectados por secciones censales con una renta neta baja de los hogares, un mayor número de miembros por hogar, un menor porcentaje de menores y un mayor porcentaje de hogares unipersonales.

El estudio ha dado pruebas de que la pandemia Covid-19 en Palma ha dado lugar a una brecha sanitaria que agudiza los desequilibrios económicos y sociales ya presentes en la ciudad. Dicha brecha define una ciudad bipolar con una zona Este deprimida y vulnerable, y una zona Oeste más rica y desarrollada que es más resiliente a los efectos de la pandemia.

Los resultados aconsejan el desarrollo de actuaciones de prevención sanitaria exhaustivas y territorializadas que permitan dar mayor apoyo a los barrios deprimidos y vulnerables de la ciudad.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo se enmarca en el proyecto de investigación GeoCovid Foment de la investigació, estudi o recerca i difusió de resultat de treballs de recerca en l'àmbit dels serveis socials, 2021. Conselleria d'Afers Socials (BOIB núm. 60, de 8 de maig de 2021). La Conselleria d'Afers Socials i Esports no se identifica necesariamente con las ideas, opiniones expuestas en este trabajo, ni se hace responsable del mismo. https://geocovid.uib.es

BIBLIOGRAFÍA

Anselin, L. (2003). An introduction to spatial autocorrelation analysis with GeoDa. *Spatial Analysis Laboratory, University of Illinois, Champagne-Urbana, Illinois*.

BOE. (2020). Real Decreto 463/2020, de 14 de marzo, por el que se declara el estado de alarma para la gestión de la situación de crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19. Boletín Oficial Del Estado, 67(14 de marzo de 2020), 25390–25400. Retrieved from https://www.boe.es/eli/es/rd/2020/03/14/463/con

Duque, I., Domínguez-Berjón, M. F., Cebrecos, A., Prieto-Salceda, M. D., Esnaola, S., Calvo Sánchez, M. y Marí-Dell'Olmo, M. (2021). Deprivation index by enumeration district in Spain, 2011. *Gaceta Sanitaria*, 35(2), 113–122. https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2019.10.008

Garcia-Morata, M., Gonzalez-Rubio, J., Segura, T. y Najera, A. (2022). Spatial analysis of COVID-19 hospitalised cases in an entire city: The risk of studying only lattice data. *Science of the Total Environment*, 806, 150521. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150521

IBESTAT (2021). Cens de població municipal. Disponible 10/06/2022 en: https://ibestat.caib.es/ibestat/inici

Kamel Boulos, M. N. y Geraghty, E. M. (2020). Geographical tracking and mapping of coronavirus disease COVID-19/severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) epidemic and associated events around the world: How 21st century GIS technologies are supporting the global fight against outbr. *International Journal of Health Geographics*, 19(1), 1–12. https://doi.org/10.1186/s12942-020-00202-8

Lindström, M. (2020). A commentary on "The trouble with trust: Time-series analysis of social capital, income inequality, and COVID-19 deaths in 84 countries." *Social Science and Medicine*, 263(October), 19–21. https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2020.113386

Marí-Dell'olmo, M., Gotsens, M., Pasarín, M. I., Rodríguez-Sanz, M., Artazcoz, L., de Olalla, P. G., Rius, C. y Borrell, C. (2021). Socioeconomic inequalities in COVID-19 in a European urban area: Two waves, two patterns. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 1–12. https://doi.org/10.3390/ijerph18031256

Oronce, C. I. A., Scannell, C. A., Kawachi, I. y Tsugawa, Y. (2020). Association Between State-Level Income Inequality and COVID-19 Cases and Mortality in the USA. *Journal of General Internal Medicine*, 35(9), 2791–2793. https://doi.org/10.1007/s11606-020-05971-3

Ruiz Pérez, M., Colom Fernández, A. (2020). Sistema de Información Geográfica anonimizado para dar soporte a la lucha contra la pandemia COVID-19 a nivel municipal. IDISBA-2020.

Schmitt-Grohé, S., Teoh, K. y Uribe, M. (2020). Covid-19: Testing Inequality in New York City. NBER Working Paper Series, 1–16. https://www.nber.org/papers/w27019

Siljander, M., Uusitalo, R., Pellikka, P., Isosomppi, S. y Vapalahti, O. (2022). Spatiotemporal clustering patterns and sociodemographic determinants of COVID-19 (SARS-CoV-2) infections in Helsinki, Finland. *Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology*, 41(July 2021), 100493. https://doi.org/10.1016/j.sste.2022.100493

Stark, O. (2021). Why reducing relative deprivation but not reducing income inequality might bring down COVID-19 infections. *Journal of Government and Economics*, 4(September), 100028. https://doi.org/10.1016/j.jge.2021.100028

Sun, Y.-Y., Li, M., Lenzen, M., Malik, A. y Pomponi, F. (2022). Tourism, job vulnerability and income inequality during the COVID-19 pandemic. *Annals of Tourism Research Empirical Insights*, 3(1), 100046. https://doi.org/10.1016/j.annale.2022.100046



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 553-562

Simulación de la construcción residencial mediante un modelo basado en agentes

N. Shurupov[1], M. Gómez Delgado[1], J. Clemente Párraga[2]

[1] Unidad Docente de Geografía. Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Universidad de Alcalá. C. Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares.
[2] Unidad Docente de Sistemas Operativos y Lenguajes. Departamento de Automática. Universidad de Alcalá. Campus Universitario, 28805 Alcalá de Henares.
nikolai.shurupov@edu.uah.es, montserrat.gomez@uah.es , julia.clemente@uah.es

RESUMEN: La utilización de Modelos Basados en Agentes (MBA) está abriendo nuevas posibilidades para el análisis de la complejidad inherente a las actuales dinámicas urbanas y sus consecuencias, ofreciendo la posibilidad de plasmar complejas interacciones entre los agentes implicados en el proceso y su entorno. En este contexto, el fenómeno de la promoción inmobiliaria conforma uno de los inductores de cambio territorial más importantes. Sin embargo, su inclusión es poco frecuente, tanto en modelos de simulación del crecimiento urbano generales, como en MBA en forma de agentes. El presente trabajo se ha centrado en estudiar las posibilidades en cuanto al uso de este tipo de actores en el proceso de simulación. Concretamente se han diseñado dos tipos de promotores, resultado de un extenso análisis de los que actualmente ejercen su actividad dentro del área de estudio: el Corredor Urbano-industrial del Henares, entre las provincias de Madrid y Guadalajara (España). El diferente comportamiento de ambos se ha basado en factores como su adaptabilidad al mercado, su capacidad de recabar información del entorno y capacidad de evaluación de las características del área de estudio. Como resultado, se ha desarrollado un prototipo en la plataforma NetLogo (una de las más utilizadas en el ámbito de los MBA) que tiene la capacidad de simular la aparición de nuevas edificaciones en suelo urbanizable en función de su tipología (unifamiliar o multifamiliar) y su estándar de calidad (alto, medio y bajo). La interfaz diseñada para el prototipo es bastante flexible, permitiendo la configuración de distintos parámetros relacionados con la demanda de cada tipo de edificación y el grado de diferenciación entre cada tipo de promotor.

Palabras-clave: modelo basado en agentes, promotores inmobiliarios, dinámica urbana, simulación construcción residencial.

1. INTRODUCCIÓN.

El último informe de Naciones Unidas indica que la expansión urbana continuará en las próximas décadas, pasando de una tasa de urbanización a nivel mundial del 56,2%, a casi un 70% en 2050 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2018) En el contexto español, un 82,2 % de la población total ya residía en 2019 en áreas urbanas (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2020). Dicha expansión está suponiendo un impacto importante sobre el planeta, siendo los cambios de usos del suelo provocados por este hecho un factor de gran incidencia en el actual proceso de cambio climático (Jia et al., 2019). Para intentar minimizar estos impactos, las simulaciones de la dinámica urbana a futuro pueden ilustrar sobre las consecuencias que pueden suponer una forma u otra de crecimiento y expansión del fenómeno urbano.

Si bien entre las distintas técnicas y modelos utilizados para este tipo de simulaciones los basados en Autómatas Celulares (AC) han sido los más ampliamente utilizados (Triantakonstantis y Mountrakis, 2012), son cada vez más los estudios que optan por la utilización de MBA, ya que abren nuevas posibilidades para el análisis de la complejidad inherente a las actuales dinámicas urbanas y sus consecuencias (Cantergiani y Gómez-Delgado, 2020). Estos permiten simular sistemas virtuales compuestos por unos agentes heterogéneos y autónomos que desarrollan su acción en un determinado entorno y con unas reglas de comportamiento que definen las interacciones de estos agentes entre ellos mismos y con su entorno. Esta estructura permite evaluar los efectos que emergen de esta interactuación a gran escala a partir de las dinámicas generadas a pequeña escala (Crooks et al., 2017; Gallagher y Bryson, 2018; Heckbert et al., 2010), así como detectar posibles patrones, estructuras y comportamientos que no estaban inicialmente programados (Macal

y North, 2010). Estos modelos siguen también una filosofía de simulación prospectiva, es decir, exploran las posibles evoluciones del sistema estudiado y permiten utilizar distintos escenarios de futuro para realizar comparaciones (Aguilera-Benavente et al., 2010).

En los estudios realizados hasta el momento, tanto los planificadores como la población aparecen como los actores determinantes en la simulación de la expansión urbana y la ocupación residencial. Sin embargo, la figura de los Promotores Inmobiliarios (PI), con un papel determinante en el proceso de construcción residencial, aparece en muchos menos estudios y siempre de manera parcial o definidos a partir de unas reglas de comportamiento muy básicas y determinísticas, sin, por supuesto, considerar la diferenciación de distintos tipos de PI actuando de manera simultánea en el territorio objeto de estudio (Alghais y Pullar, 2018; Cantergiani y Gómez-Delgado, 2018; Filatova, 2015; Kaviari et al., 2019; Ligmann-Zielinska, 2009; Mustafa et al., 2017; Tan et al., 2015; Zhuge et al., 2016).

El punto principal de partida para intentar diferenciar la acción de distintos tipos de agentes como PI, sería conocer de manera más empírica cuestiones relacionadas con su comportamiento y forma de proceder y actuar. En general cualquier promotora se define por las siguientes características: búsqueda de beneficios económicos a corto plazo, ejecución rápida de los proyectos para poder pasar al siguiente (Mohamed, 2006) y minimización del riesgo de la inversión una vez alcanzan un umbral de beneficio económico (Magliocca et al., 2014). Sin embargo, también existen diferencias entre ellas, especialmente en la capacidad económica y la cantidad y calidad de la información a la que tienen acceso, lo que genera una competencia que da lugar a distintos niveles de actuación (Calderón-Calderón, 2002; Calderón-Calderón, 2004; Naredo, 2010). Por lo tanto, los PI no presentan un comportamiento homogéneo y plasmar estas diferencias a través de un MBA con varios tipos de agentes puede resultar de gran interés.

Tomando como referencia el modelo desarrollado por Cantergiani y Gómez-Delgado (2020), el presente trabajo pretende profundizar en las posibilidades de representar distintos tipos de agentes PI que intervendrían en la dinámica urbana futura del Corredor Urbano-industrial del Henares, entre las provincias de Madrid y Guadalajara (España). Para ello se caracterizará en primer lugar los distintos tipos de PI que operan actualmente en el área de estudio. Con estos datos, y las premisas de partida del modelo preexistente (AMEBA, *Agent-based Model for the Evolution of urBan Areas*), se diseñará y programará un nuevo submodelo con una nueva interfaz de usuario que permita introducir la acción diferenciada de varios tipos de estos agentes.

El trabajo se estructura de la siguiente forma: en el epígrafe 2 se presenta el área de estudio, los PI que ejercen su actividad en ella y el proceso seguido para su diferenciación, así como las modificaciones introducidas en la conceptualización del submodelo preexistente. El epígrafe 3 presenta la nueva propuesta de submodelo desarrollada y su interfaz, así como unos resultados preliminares. Finalmente, el epígrafe 4 presenta la discusión y conclusiones del trabajo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS.

AMEBA está compuesto por tres tipos de agentes: planificadores, PI y población, cada uno plasmado en un submodelo. El submodelo 2, que refleja la actividad de los PI con un único tipo de agente, incorpora información relativa a la zonificación legal del área de estudio, el precio, el número de viviendas y las distancias a zonas de interés (carreteras, zonas urbanas consolidadas y estaciones de tren). Con toda esta información se evalúan las zonas con potencial de construcción (categorizadas como urbanizables) e incrementa el valor de número de viviendas en función del estándar de la vivienda construida.

Existen diferentes plataformas y lenguajes de programación para la construcción de MBA. Dado que la presente investigación ha tomado como punto de partida a AMEBA, se ha escogido la misma plataforma utilizada: *NetLogo*[1]. Es de código abierto, gratuita y de fácil iniciación. Ofrece una interfaz, guías y lenguaje de programación sencillos, que facilitan tanto la inclusión de nuevos usuarios en este ámbito, como el uso educativo para el profesorado, siendo por tanto una plataforma ampliamente utilizada (Abar *et al.*, 2017).

2.1. Caracterización de los agentes promotores en el área de estudio (Corredor del Henares).

El área de estudio donde se ha desarrollado y testado el modelo AMEBA comprende 18 municipios de la Comunidad de Madrid (Figura 1), pertenecientes a un importante y dinámico corredor urbano-industrial entre Madrid y Guadalajara (Corredor del Henares), donde todavía existen municipios con posibilidades de expansión urbana.

[1] *https://ccl.northwestern.edu/netlogo/*

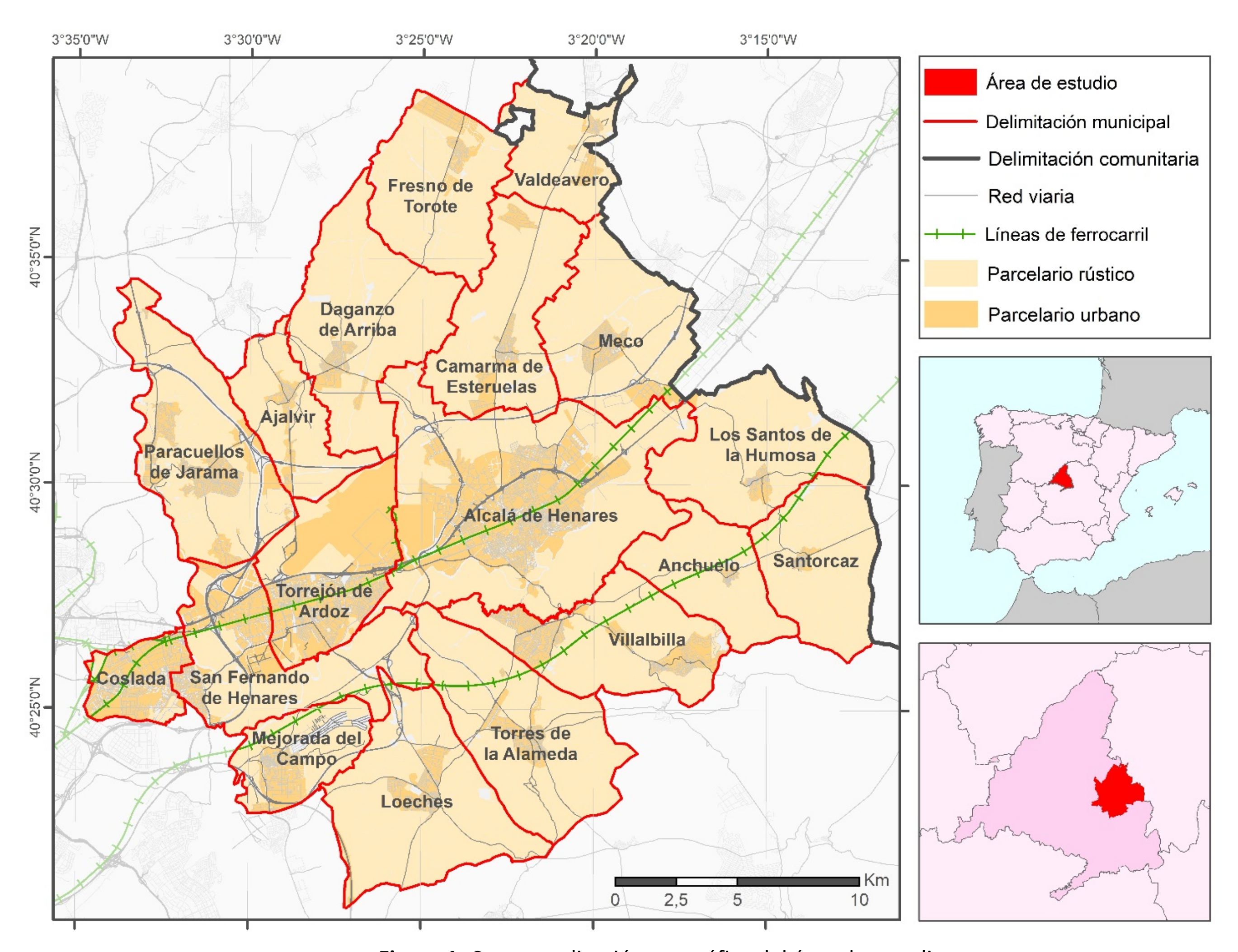


Figura 1. Contextualización geográfica del área de estudio.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos catastrales de la Dirección General del Catastro (DGC) y BTN25 del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

Para solventar el problema de falta de información sobre las dinámicas, tanto internas como externas, de los PI en el área de estudio, se ha realizado un análisis del mercado de vivienda de nueva obra, junto con una localización y catalogación de los proyectos inmobiliarios concretos de cada promotor. Se han diferenciado las distintas promociones en desarrollo en función del estándar (alto, medio o bajo) y del tipo de edificación (unifamiliar o multifamiliar). Para la clasificación según estándar se ha optado por la utilización del precio de las viviendas, estableciendo los siguientes intervalos: bajo: ≤ 150 000 €; medio: > 150 000 € ≤ 360 000 € y alto: > 360 000 €.

En función del tipo de promociones diferenciadas, se muestra en la Tabla 1 los PI que las llevan a cabo y, mediante el superíndice, al tipo que pertenecen. Las características de cada uno de ellos son las siguientes:

- [1]**Generalista**: lleva operando en el área de estudio durante un período prolongado, posee (por la característica anterior o por otros motivos) mayor acceso a información sobre el área de estudio y tiene suficiente respaldo económico como para competir en diversos segmentos y áreas de la zona, por lo que tiene gran capacidad de adaptación a los requerimientos del mercado.
- [2]**Especializado**: lleva menos tiempo operando en el área de estudio, tiene un acceso más limitado a información, opera con márgenes de beneficio menores, le cuesta más adaptarse a los requerimientos del mercado y debe embarcarse en proyectos que conllevan más dificultades en su ejecución y, por tanto, mayor riesgo.

Tabla 1. PI con promociones actualmente activas en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de información de los portales Idealista y Pisos.com.

		ESTÁNDAR		
		Bajo	*Medio*	*Alto*
TIPO DE EDIFICACIÓN	*Unifamiliar*		Cooper Actívate[1] Alena promotores[2] Aedas Homes[1] Hi!Real Estate[1] Grupo Ferrocarril[1] Kampodomo[1] Zanda Homes[2] Aldesa Home[1]	Iberdrola[2] Design & Häuser[2] Aedas Homes[1] Hi! Real Estate[1] Wilcox[1] Momentum Real Estate[2] Nuevo Valkey[1] Reintor[2]
	Multifamiliar	Camporrosso[1] Alcalá Home[2] Amenábar Promociones[1] Servihabitat[2] Adania[2] Factory Casas[2] Hola pisos[2] Altamira[2]	Cooper Actívate[1] Viveland[2] SJ8 Herrería[2] Camporrosso[1] ASG Homes[2] Pryconsa[2] Promored[2] SG Villas Alcalá[2] V.C.R.[2] Gestilar[2] Aedas Homes[1] Amenábar Promociones[1] Hi!Real Estate[1] Grupo Ferrocarril[1] Tecnohbitat[2] Kampodomo[1] Wilcox[1] Asentis[2] Premier[2] Baquero indecor[2] Grupo comillas 2[2] Aldesa Home[1] Activitas[2] Nuevo Valkey[1] Salzhenia[2] Solvia[1] Sagelliv[2]	CBRE[2] Hi! Real Estate[1] Kronos Homes[2] Gilmar[2] Solvia[1]

2.2. Conceptualización del nuevo submodelo.

A continuación se detallan las características que tendrá el entorno (que incluye información utilizada por el submodelo 2 de AMEBA), las propiedades de los agentes (modificadas en función del estudio y caracterización realizados) y los parámetros que el usuario podrá ajustar para ejecutar distintas simulaciones de acción de estos nuevos PI.

2.1.1. Entorno.

El submodelo propuesto opera con un tamaño de píxel de 25m x 25m, equivalente a un área de 625m2, y representando cada píxel la unidad mínima edificable, es decir, directamente una edificación. Además de esto, cada píxel del entorno posee diferente información asociada que define cada una de las características concretas del entorno. En primer lugar, cada píxel está caracterizado por la tipología de edificación presente. Se diferencia en las tipologías anteriormente descritas y el vacante, que define aquellos píxeles que tienen capacidad de ser edificados. Adicionalmente, cada píxel tiene información correspondiente a los factores a tener en cuenta para la simulación (Tabla 2).

Tabla 2. Caracterización del entorno. Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos de partida del modelo de referencia. (*) indica los nuevos factores que se han incorporado.

FACTOR	DESCRIPCIÓN
Zonificación legal	Clasificación del suelo en urbano, urbanizable, no urbanizable y sistemas generales
Clasificación del uso*	Uso unifamiliar, multifamiliar o vacante
Zonificación por coste del suelo	Alto, medio o bajo coste
Distancia a zonas urbanas consolidadas	Caracteriza el atractivo de cada píxel en función de la distancia a los distintos elementos de referencia. A menor distancia, mayor atractivo
Distancia a carreteras	
Distancia a zonas de trabajo*	
Distancia a zonas verdes*	
Distancia a transporte público	Atractivo decreciente hasta una distancia de 1000m, a partir de la cual se convierte en nulo

2.1.2. Agentes.

En esta nueva propuesta, cada agente tiene una serie de variables internas que definen, por un lado, su estado, y por otro sus características distintivas que se diferencian en función de tres aspectos:

- **Acceso a información**: cada agente tiene acceso a una cantidad limitada de información en función de su posición en el entorno. Esto se traduce en un área a su alrededor sobre el que el agente puede operar denominada área de actuación. Los PI de tipo 1 actúan en un área dos veces mayor que los PI de tipo 2.
- **Adaptación al mercado**: a medida que la demanda de cada tipo de edificación se va cubriendo y se produce una saturación en el mercado de una tipología de edificación determinada, cada promotor se adapta para construir tipologías de edificaciones que aún no están cubiertas. En este sentido, un promotor, pese a querer construir un determinado tipo de edificación, necesita evitar tipologías de edificaciones que estén ya cubiertas, puesto que la saturación implica menores ventas en el futuro. De esta manera, durante la ejecución del submodelo, los PI efectúan intentos de construcción de una tipología de edificación determinada. Si no lo consiguen deberán adaptarse y construir otro tipo de edificación para obtener algún beneficio. Los PI tipo 1 necesitan "fallar" tres veces antes de optar por construir otra tipología y los de tipo 2 seis veces.
- **Preferencias de los PI**: cada tipo de promotor evalúa las características de la zona de forma distinta. Ambos aplican la ecuación 1 para evaluar la calidad de determinada zona:

  $$A_{t,e} = \sum A_f \cdot \alpha_{t,e,f} \quad (1)$$

  Donde $A_{t,e}$ es la aptitud del píxel para una tipología t y un estándar e,
  A_f el valor de aptitud para cada uno de los factores f detallados en la Tabla 2 y
  $\alpha_{t,e,f}$ el coeficiente aplicado según la tipología t y estándar e para el factor f.

  $\alpha_{t,e,f}$ engloba dos aspectos de una promoción: 1) qué características de una edificación de determinado tipo y estándar son las que más le interesa a la población y, 2) cómo evalúa el promotor la viabilidad económica de la nueva edificación. Estos aspectos están plasmados mediante una corrección de cada coeficiente $\alpha_{t,e,f}$ con el factor β, aplicado en forma de $\alpha = \alpha^{\beta}$. Para los PI de tipo 1, $\beta = 0.5$, y para los PI de tipo 2, $\beta = 1.5$.

2.1.3. Parámetros del submodelo.

Con los agentes y el entorno definido, a continuación se detallan los parámetros que podrán ser configurados por el usuario, previa ejecución del submodelo:

- **Número de iteraciones**: número de veces que se va a completar un ciclo completo de ejecución. En cada ciclo de ejecución el submodelo suple el total de la demanda que el usuario introduzca. Puede tomar cualquier valor entero mayor a 0.
- **Demanda de edificaciones de cada tipo**: cantidad de edificaciones que deben ser construidas de cada combinación entre tipología-estándar. Puede tomar para cada tipo cualquier valor entero mayor a 0.
- **Número de PI de cada tipo**: cantidad de agentes de cada tipo de PI que habrá en el área de estudio. Puede tomar cualquier valor entero mayor a 1.

- **Área de actuación base**: alcance, en cantidad de píxeles, que tienen todos los PI en su entorno inmediato. El área de actuación final de cada tipo de PI asegurará que el tipo 1 tiene el doble que el tipo 2, realizando para ello un aumento porcentual en el tipo 1 y una reducción en el tipo 2. Puede tomar cualquier valor entero mayor a 0.
- **Ponderación de los factores**: permite, para cada tipología y estándar, definir un valor de α para cada factor. Estos valores de α serán corregidos para cada tipo de promotor. De esta manera el usuario puede configurar cada uno de estos coeficientes para cata factor-tipología-estándar, ofreciendo una gran flexibilidad a la hora de caracterizar las simulaciones y generar distintos escenarios. Puede tomar cualquier valor entre 0 y 1 con intervalos de 0.1 para cada factor.

3. DESARROLLO DEL SUBMODELO

Habiendo expuesto todas las características y componentes del submodelo, se detalla en la Figura 2 la interfaz de usuario diseñada para para interactuar con el mismo.

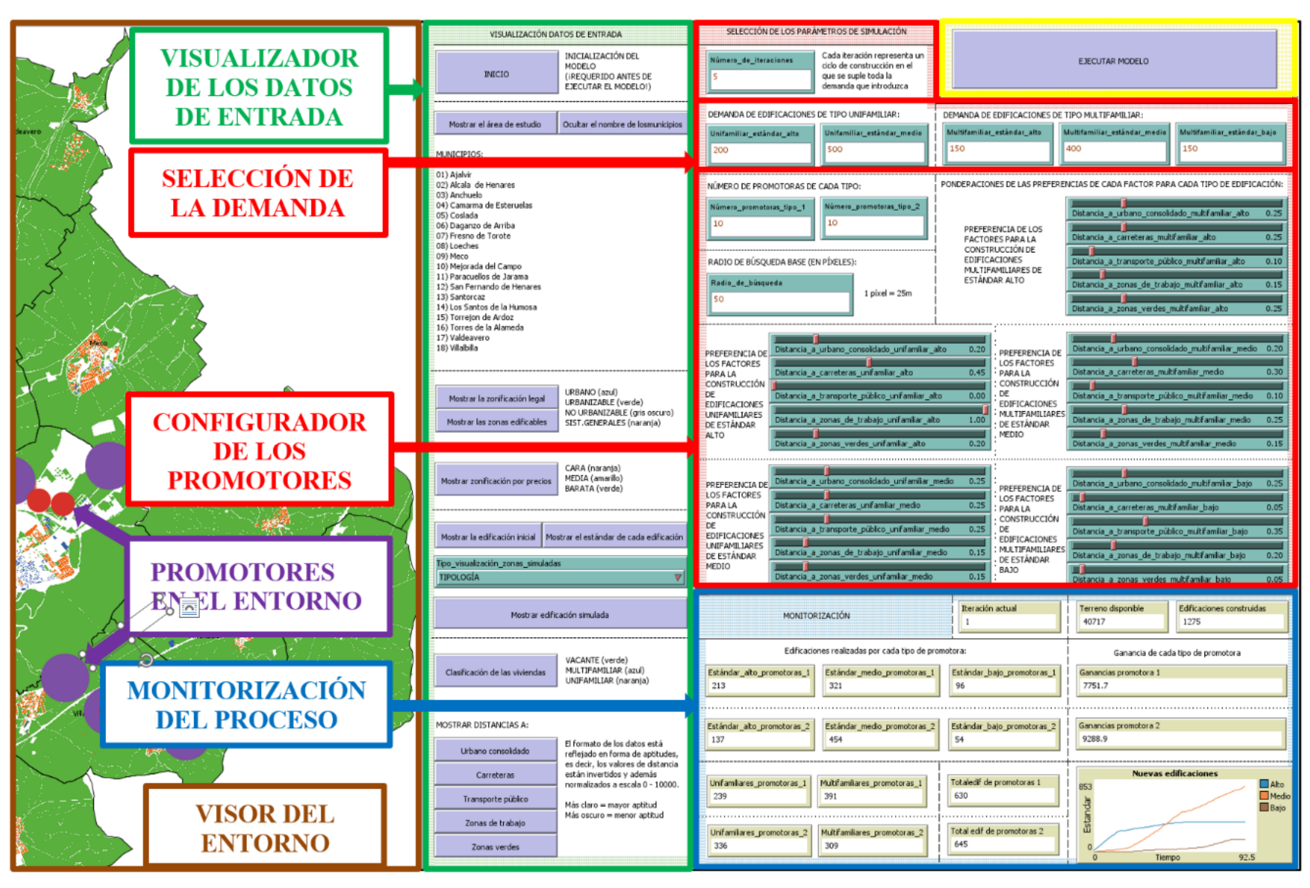


Figura 2. Interfaz del nuevo submodelo. Fuente: Elaboración propia.

La interfaz consta principalmente de tres módulos, además del visor del entorno (que se muestra de forma parcial en la Figura 2). El módulo de visualización permite escoger los datos que el visor del entorno debe mostrar. Se pueden observar todos los datos de entrada, las zonas edificables, antes y después de ejecutar el submodelo, así como los resultados de la simulación, agrupados según el criterio del usuario. El módulo de configuración permite seleccionar: a) número de iteraciones, b) cantidad que debe ser edificada en cada iteración y c) características generales de los PI. El módulo de monitorización muestra el valor de las variables relevantes a lo largo de la ejecución de la simulación. Es posible ver en todo momento la cantidad de edificaciones que cada tipo de promotor ha construido, las ganancias que han obtenido y el ritmo al que se construye cada estándar de edificación. El submodelo proporciona como salida imágenes de tipo ráster en formato ASCII con las edificaciones simuladas agrupadas de distinta manera (en función del estándar, la

tipología y ambos), así como un archivo CSV con las estadísticas de crecimiento para cada uno de los municipios de la zona de estudio. Se muestra en la Figura 3 el diagrama de secuencia en formato UML2.

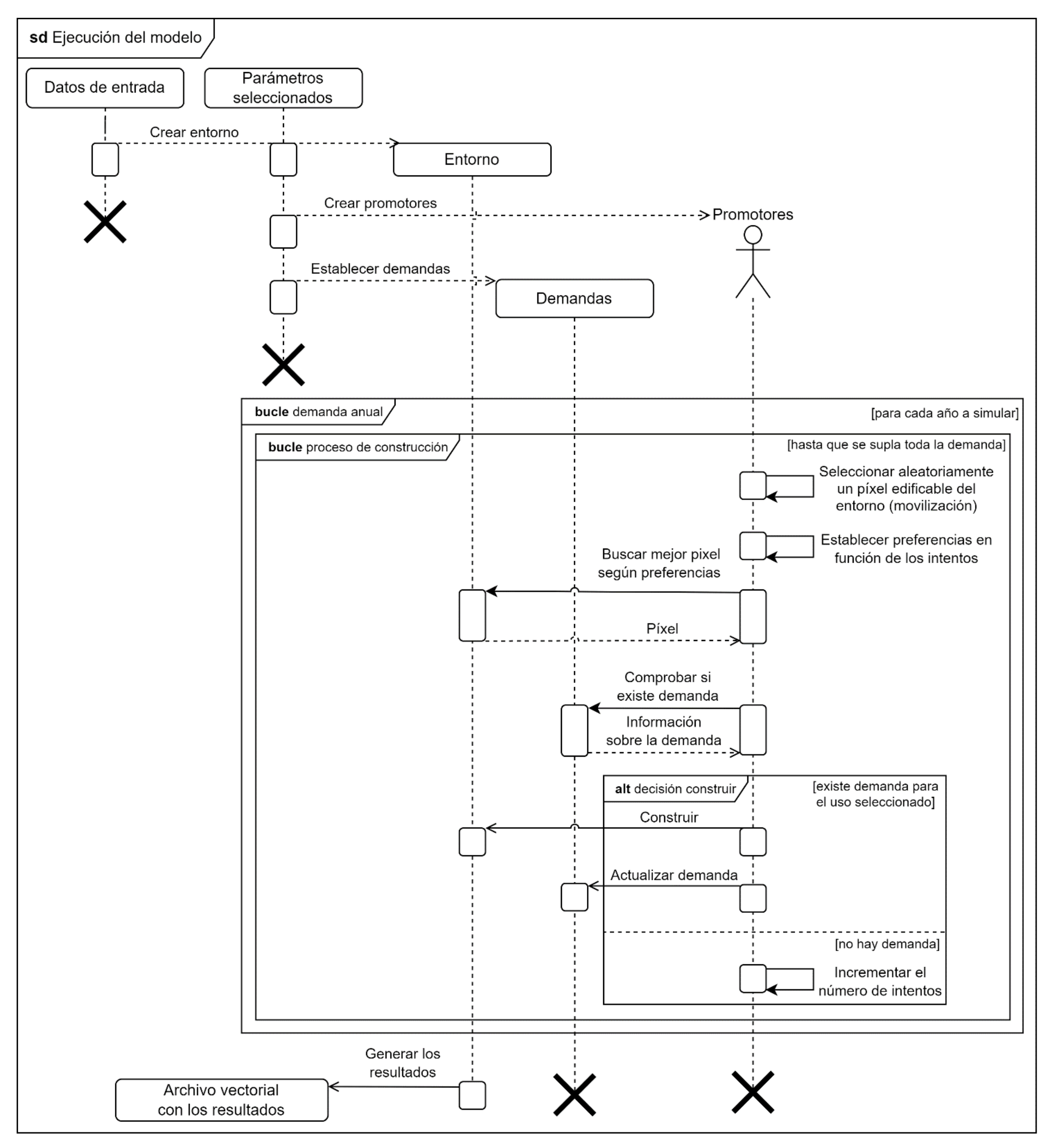


Figura 3. Diagrama de secuencias UML del submodelo. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 muestra los resultados preliminares de una simulación realizada con 10 PI de cada tipo, un área de actuación base de 50 píxeles y 5 iteraciones equivalentes a un total de 10 años. En la zona (a), que muestra el municipio de Coslada, se pueden observar fenómenos de concentración residencial con una importante mezcla de tipología. La zona (b), que pertenece al municipio de Torres de la Alameda, muestra cómo se generan distintos focos de crecimiento con una mezcla de usos menor y con una predominancia de uso

[2] Lenguaje unificado de modelado (por sus siglas en inglés, *Unified Modeling Language*).

unifamiliar, reflejando las proporciones características de la zona. Para el caso de la zona (c), que refleja una parte del municipio de Alcalá de Henares, se observan distintos focos de crecimiento, tanto muy dispersos como concentrados y con importantes mezclas de tipología. Así mismo, también se han localizado las promociones que hay actualmente en curso. Si bien estos datos no están coordinados con la clasificación del catastro (algunas promociones están totalmente edificadas, y esto está reflejado en la información catastral, mientras que otras están aún en proceso), sirven como una primera comparación visual con los resultados simulados. En general se observa que el submodelo es capaz de reproducir patrones de crecimiento muy similares a los observados en las promociones actuales.

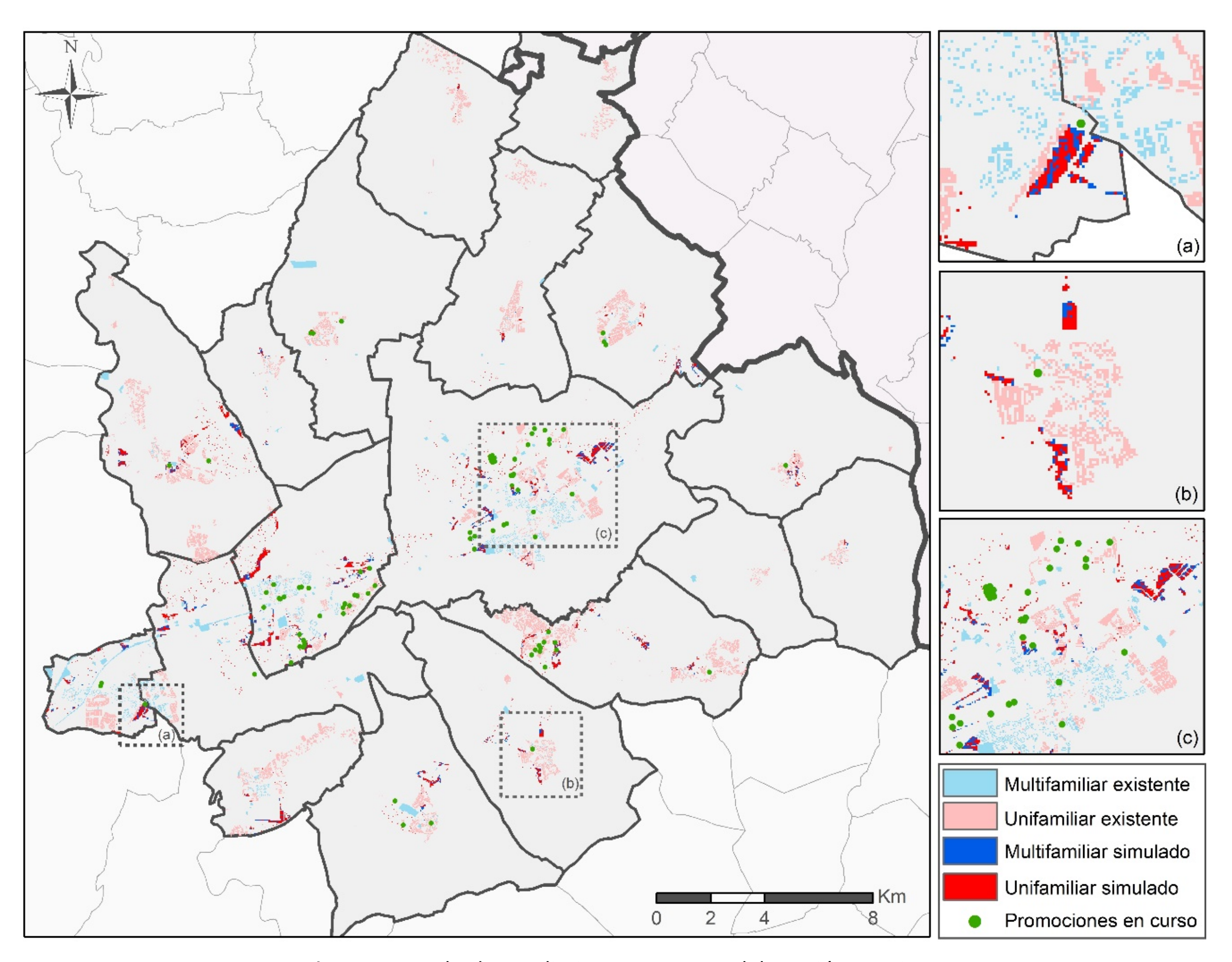


Figura 4. Resultados preliminares. Fuente: Elaboración propia

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El fenómeno de construcción residencial por parte de los PI constituye un componente clave en las dinámicas urbanas, especialmente en países como el nuestro. Sin embargo, su actividad no ha sido suficientemente reflejada y reproducida en los estudios de simulación realizados hasta ahora mediante MBAs. La acción de los PI en estos modelos suele ser bastante determinista, obedeciendo a reglas muy concretas y genéricas para todos ellos, no reproduciéndose distintos tipos de comportamiento para distintos PI, ni la posibilidad de interactuación entre ellos.

Con el presente trabajo se ha intentado realizar una primera aproximación al estudio de este fenómeno mediante el desarrollo de un MBA que incorpora 2 tipos de agentes PI. Estos dos tipos de agentes responden a las características de las promociones llevadas a cabo en la zona de estudio. El mayor reto y dificultad ha sido intentar reproducir distintos comportamientos para cada promotor en función de la escasa información a la que es posible acceder, por razones evidentes de competitividad en el mercado inmobiliario. Así, somos conscientes de que el submodelo presenta todavía diversas limitaciones. Por un lado, no se ha

modelizado explícitamente procesos de competencia o negociación entre los PI, aspectos que pueden implementarse mediante un sistema de pujas o la resolución mediante teoría de juegos (Tan et al., 2015; Kaviari et al., 2019). Por otro lado, tampoco se han implementado criterios de vecindad, ni en cuanto a tipología de edificación, ni en cuanto a estándar. En este sentido, sería de utilidad añadir un factor que controle la cantidad de mezclas de uso que cada tipo de promotor está dispuesto a asumir en sus procesos de construcción.

Aun así, pensamos que el presente trabajo supone un avance modesto, pero decisivo. La complejidad del comportamiento humano y la falta de información han sido los grandes retos afrontados. La diferenciación realizada responde a un análisis los más detallado posible de la acción de los PI de un área de estudio concreta, pero pensamos que puede ser extrapolable a otras zonas con características similares. Por otro lado, el nuevo submodelo desarrollado permite trabajar con un alto nivel de detalle, manejando hasta 5 tipos de edificaciones diferentes. Finalmente, presenta gran flexibilidad a la hora de la configuración de sus parámetros, lo que abre la posibilidad a trabajar con diferentes escenarios de futuro.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el contexto del proyecto TRANSURBAN (Simulación de escenarios colaborativos para integrar políticas de transportes urbano sostenible y usos del suelo) financiado por el *Ministerio de Economía y Competitividad de España* (CSO2017-86914-C2-1-P).

5. BIBLIOGRAFÍA

Abar, S., Theodoropoulos, G. K., Lemarinier, P., y O'Hare, G. M. P. (2017). Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*. https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001

Aguilera-Benavente, F., Gómez-Delgado, M., y Cantergiani, C. (2010). Instrumentos de simulación prospectiva del crecimiento urbano. *Ciudad y Territorio Estudios Territorial*, *XLII*(1), 481–496.

Alghais, N., y Pullar, D. (2018). Modelling future impacts of urban development in Kuwait with the use of ABM and GIS. *Transactions in GIS*, *22*(1), 20–42. https://doi.org/10.1111/tgis.12293

Calderón-Calderón, B. (2002). Ganar tamaño y territorio: fusiones de empresas y nuevos yacimientos de actividad en el sector inmobiliario español. *Investigaciones Geográficas*, *28*(28), 71. https://doi.org/10.14198/ingeo2002.28.04

Calderón-Calderón, B. (2004). La Ciudad Del Todo Urbanizable : Estrategias Del Sector Inmobiliario Y Nuevas E Insostenibles Formas De Urbanización . the City of " the All Developable Land ": Strategies of the Real Estate and New and. *Ciudades*, *8*(2004), 135–155.

Cantergiani, C., y Gómez-Delgado, M. (2018). Urban land allocation model of territorial expansion by urban planners and housing developers. *Environments*, *5*(1), 1–21. https://doi.org/10.3390/environments5010005

Cantergiani, C., y Gómez-Delgado, M. (2020). Simulación del crecimiento urbano con AMEBA: Modelo Basado en Agentes para la ocupación residencial. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, *86*. https://doi.org/10.21138/bage.2910

Crooks, A., Heppenstall, A. J., y Malleson, N. (2017). Agent-Based Modeling. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09704-9

Filatova, T. (2015). Empirical agent-based land market: Integrating adaptive economic behavior in urban land-use models. *Computers, Environment and Urban Systems*, *54*, 397–413. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.06.007

Gallagher, E. M., y Bryson, J. J. (2018). Agent-Based Modelling. *Encyclopedia of Animal Cognition and Behavior*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47829-6_224-1

Heckbert, S., Baynes, T., y Reeson, A. (2010). Agent-based modeling in ecological economics. *Annals of the New York Academy of Sciences*. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05286.x

Jia, G., Shevliakova, E., Artaxo, P., De Noblet-Ducoudré, N., Houghton, R., House, J., Kitajima, K., Lennard, C., Popp, A., Sirin, A., Sukumar, R., y Verchot, L. (2019). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Chapter 2: Land-climate interactions. *Online edition,*

available in: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf

Kaviari, F., Mesgari, M. S., Seidi, E., y Motieyan, H. (2019). Simulation of urban growth using agent-based modeling and game theory with different temporal resolutions. *Cities*, *95*(June), 102387. https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.06.018

Ligmann-Zielinska, A. (2009). The impact of risk-taking attitudes on a land use pattern: An agent-based model of residential development. *Journal of Land Use Science*, *4*(4), 215–232. https://doi.org/10.1080/17474230903220386

Macal, C. M., y North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*. https://doi.org/10.1057/jos.2010.3

Magliocca, N. R., Brown, D. G., McConnell, V. D., Nassauer, J. I., y Westbrook, S. E. (2014). Effects of alternative developer Decision-Making models on the production of ecological subdivision designs: Experimental results from an agent-based model. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *41*(5), 907–927. https://doi.org/10.1068/b130118p

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2020). Áreas urbanas en España 2019. *Gobierno de España*. Disponible en: https://www.mitma.gob.es/CVP/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=BAW070

Mustafa, A., Cools, M., Saadi, I., y Teller, J. (2017). Coupling agent-based, cellular automata and logistic regression into a hybrid urban expansion model (HUEM). *Land Use Policy*, *69*(December 2015), 529–540. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.009

Naredo, J. M. (2010). El modelo inmobiliario español y sus consecuencias. *Boletín CF+ S*, *44*, 13–27. http://habitat.aq.upm.es/boletin/n44/ajnar.html

Tan, R., Liu, Y., Zhou, K., Jiao, L., y Tang, W. (2015). A game-theory based agent-cellular model for use in urban growth simulation: A case study of the rapidly urbanizing Wuhan area of central China. *Computers, Environment and Urban Systems*, *49*, 15–29. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.09.001

Triantakonstantis, D., y Mountrakis, G. (2012). Urban Growth Prediction: A Review of Computational Models and Human Perceptions. *Journal of Geographic Information System*, *04*(06), 555–587. https://doi.org/10.4236/jgis.2012.46060

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision 2018. *Online Edition*, *available in:* https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf/

Zhuge, C., Shao, C., Gao, J., Dong, C., y Zhang, H. (2016). Agent-based joint model of residential location choice and real estate price for land use and transport model. *Computers, Environment and Urban Systems*, *57*, 93–105. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.02.001



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 563-572

Aplicación de los estándares de la Agenda Urbana Española para el análisis de los equipamientos públicos municipales en la ciudad de Valladolid

B. Torinos Aguado[1], I. Rabanaque Hernández[2], C. López Escolano[2]

[1] Centro de Observación y Teledetección Espacial, S.A.U., Parque Tecnológico de Boecillo, C/Luis Proust, 17,47151, Boecillo, Valladolid.
[2] Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio-Instituto Universitario de Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50.009 Zaragoza.

beatriztorinos@grupotecopy.es , irh@unizar.es, cle@unizar.es

RESUMEN: La planificación urbana resulta fundamental para desarrollar modelos que fomenten la sostenibilidad, compacidad y equilibrio en las ciudades. Así, el objetivo del presente estudio es analizar los equipamientos públicos municipales en la ciudad de Valladolid (España) para conocer si se adecúan a las necesidades ciudadanas, tomando como base las distancias establecidas en la Agenda Urbana Española. En concreto, se analiza la proximidad a los equipamientos, así como el grado de cobertura espacial a través de la utilización de diferentes métodos de análisis con SIG, basados en la selección por localización. Estos procedimientos relacionan los equipamientos con la distancia a las secciones censales, ya sea considerando cualquiera de sus partes o su centroide. Tras comparar ambos métodos, se trabaja con el primero de los mencionados. Los resultados muestran que la cobertura general para el conjunto urbano es adecuada, sobre todo en los servicios de transporte público, lo que favorece la accesibilidad de la población. También se evidencia la existencia de secciones censales que no están cubiertas por la mayoría de los equipamientos, por lo que sería necesario su estudio detallado para intentar paliar esas desigualdades.

Palabras-clave: equipamientos públicos, Agenda Urbana Española, planificación urbana, Valladolid.

1. INTRODUCCIÓN

En una situación donde las ciudades concentran ya a más de la mitad de la población global y gran parte de la actividad económica, siendo responsables de la mayoría de las emisiones de gases de efecto invernadero (OMS, 2020), la planificación urbana cobra especial relevancia entre las agendas políticas internacionales, que permiten orientar el modelo urbano para mejorar la calidad de vida y el bienestar de sus habitantes, para lo cual una adecuada localización de dotaciones y servicios públicos resulta fundamental. Estos equipamientos se conciben como agentes de cohesión social, siendo elementos integradores cuyo fin último es posibilitar la igualdad de oportunidades sin distinciones por niveles de renta o grupo social de pertenencia (Hernández Aja, 2000).

Específicamente, recuperar el enfoque de la ciudad que plasmó Jane Jacobs (Jacobs, 1961) o la "ciudad de los 15 minutos" son líneas de planificación donde lograr una adecuada proximidad y accesibilidad a los equipamientos públicos tiene un papel central en el rediseño urbano ya que evita desplazamientos motorizados y mejora la calidad de vida de la población. Por ello, es fundamental hacer una revisión de los equipamientos que disponen las ciudades, analizar su distribución espacial y estimar el alcance de la población hasta estos servicios públicos para determinar si son realmente útiles y cumplen los objetivos de proximidad espacial que plantean las políticas urbanas actuales.

En este marco, adquieren gran importancia las capacidades de análisis de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) junto a la representación de los resultados mediante cartografía temática, para facilitar la transmisión de la información y fortalecer la toma de decisiones (Pueyo-Campos et al., 2016).

En este contexto, este trabajo analiza la distribución de los equipamientos públicos de la ciudad de Valladolid (España) de acuerdo a los criterios de disponibilidad y accesibilidad que establece la Agenda Ur-

bana Española (AUE), política de carácter estatal que pretende impulsar la toma de decisiones acertadas en materia de políticas urbanas para hacer ciudades más sostenibles e inclusivas.

1.1. La Agenda Urbana Española y la Agenda 2030

La Agenda Urbana Española (AUE) es un documento estratégico sin carácter normativo, consecución del Plan de Acción de la Agenda 2030 en España. La AUE es fruto de la integración de los objetivos de la Agenda 2030 y de la Agenda Urbana para la UE. Se trata de una propuesta del gobierno para ayudar a que las decisiones que se tomen en materia de políticas urbanas sean más sostenibles e inclusivas, a través de una visión global y sistémica, sostenidas en la colaboración entre múltiples actores (de la Cruz-Mera, 2019).

La AUE ofrece un Decálogo de Objetivos Estratégicos, que se concretan en 30 objetivos específicos y 291 planes de actuación, pudiendo ser aplicados en cualquier asentamiento urbano sin importar su tamaño, bajo las premisas de la sostenibilidad económica, social y ambiental. Todos los objetivos estratégicos establecidos por la AUE están vinculados con el ODS número 11, cuyo propósito es lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles (ONU, 2012), asegurando el acceso a la vivienda y servicios básicos adecuados a través del incremento de la urbanización integradora y sostenible.

Siguiendo los estándares establecidos por la AUE, el trabajo se centra en el segundo de los objetivos estratégicos, relativo a evitar la dispersión urbana y revitalizar la ciudad existente. En concreto, se revisa su primer objetivo específico: “definir un modelo urbano que fomente la compacidad, el equilibrio urbano y la dotación de servicios básicos” (AUE, 2019). Este indicador analiza el porcentaje de población próxima a los principales servicios básicos y su seguimiento permite conocer el grado de integración urbana, facilitando la ocupación y transformación del suelo de acuerdo con modelos sostenibles de desarrollo.

1.2. Caso de estudio, la ciudad de Valladolid

Valladolid se encuentra, aproximadamente, en el centro geográfico del cuadrante noroccidental de la Península Ibérica. Es la capital política y ciudad más habitada de la Comunidad Autónoma de Castilla y León (España). Cuenta con una superficie de 197,9 km^2 y una población de 299.370 habitantes en 2021 de acuerdo con el Servicio de Información del Ayuntamiento de Valladolid; presenta una densidad de población en relación con su término municipal de 1.512,7 hab./km^2. La ciudad concentra el 57,5% de la población total de su provincia y el 12,5% de la Comunidad Autónoma. A su vez, Valladolid ocupa el decimotercer puesto entre las ciudades más pobladas de España, clasificada dentro del conjunto de “ciudades medias” españolas (Martínez Navarro et al., 2020), por lo que su estudio es de interés para la planificación urbana como ejemplo de este tipo de urbes.

La ciudad está formada por 41 barrios agrupados en 10 distritos urbanísticos, debiendo su fisionomía a las intensas transformaciones urbanas producidas en el siglo XX. El espacio burgués de la ciudad orientó su expansión hacia el sur, al ser la única dirección sin límites físicos, dado que al oeste se encuentra el río Pisuerga, al norte el río Esgueva y al este el ferrocarril (García Martín, 2019).



Figura 1. Mapa de localización de Valladolid. Elaboración propia.

2. METODOLOGÍA

Para realizar el análisis espacial de los equipamientos de Valladolid y determinar el grado de cobertura de la población se parte de información georreferenciada en formato vectorial (secciones censales, distritos urbanísticos, servicios municipales) para implementar en un SIG (*ArcGIS 10.7.1*). Todo ello ha sido proporcionado por el Ayuntamiento de Valladolid, de donde también se ha obtenido un fichero de datos que contiene la población por grupos quinquenales de edad de cada distrito y sección censal de la ciudad.

No ha sido posible realizar el estudio con un mayor nivel de detalle, dado que la escala más desagregada se corresponde con las secciones censales, cuya resolución espacial facilita el estudio a mesoescala de cuestiones urbanas (Escolano-Utrilla et al., 2021). Sin embargo, disponer de información a otras escalas, como manzanas, facilitaría el diagnóstico de problemáticas urbanas con una mayor precisión que por secciones censales o distritos urbanísticos (Rabanaque Hernández et al., 2014).

Para cuantificar el número de habitantes cubiertos por los equipamientos se han incorporado los datos de población a la capa de secciones censales, al tiempo que se ha depurado la información de la capa de servicios municipales manteniendo únicamente los servicios que la AUE considera como básicos.

2.1. Metodología planteada por la AUE

La AUE dispone un sistema de indicadores que especifica las distancias óptimas de la población a los servicios y equipamientos, lo que permite determinar la proximidad de la población a los mismos. En total, se han empleado ocho tipos básicos de equipamientos clasificados según el tipo de servicio que prestan, adaptándose a la catalogación realizada por la AUE (Tabla 1).

Tabla 1. Servicios básicos y distancia óptima considerada. Fuente: AUE, 2019.

Servicio básico	*Compuesto por*	*Distancia (en metros)*
Alimentación	Mercados municipales	500
Centros educativos	Centros de Educación Infantil y Primaria	300
	Centros de Educación Secundaria	500
Centros sanitarios	Centros de salud	500
	Hospitales	1000
Centros sociales	Centros de Acción Social, Centros de Personas Mayores, asociaciones vecinales, atención al inmigrante, servicios a la dependencia, comedor social	500
Centros deportivos	Polideportivos, estadios, piscinas, pistas deportivas	500
Centros culturales	Bibliotecas, centros cívicos, centros de iniciativas ciudadanas, cines, teatros	500
Puntos de recogida de residuos	Contenedores de papel, vidrio y aceite	100
Transporte público	Paradas de autobuses urbanos	300

Cabe destacar que la distancia considerada para las paradas de transporte público es fruto de la última actualización de la AUE (septiembre de 2021) relativa a los datos descriptivos, que posibilitan un acercamiento a la situación urbana actual, integrando herramientas para que las ciudades tomen sus propias decisiones y así cumplir los objetivos marcados en la Agenda Urbana.

2.2. Proceso de selección por localización y métodos posibles

Una vez definidos los equipamientos básicos a analizar y las distancias a cada uno de ellos, se calcula el número de habitantes a los que prestan servicio, tomando como base las secciones censales.

Para ello, se realiza una selección por localización, de la que se identificará previamente cada categoría para que la selección se realice solo sobre los equipamientos elegidos. El resultado son las secciones censales que cumplen con los estándares fijados en la selección por localización al aplicar la distancia de búsqueda correspondiente a cada categoría (Tabla 1).

La selección por localización se puede realizar por dos métodos diferentes:

- Método A: las entidades de la capa de destino están dentro de una distancia de la entidad de la capa fuente. Esta opción genera *buffer* con la distancia indicada en torno a las entidades de la capa fuente (los equipamientos) y selecciona todas las entidades (todas las secciones censales que intersecan esos *buffers*).
- Método B: las entidades de la capa de destino tienen su centroide en la entidad de la capa fuente. Esta opción selecciona una entidad de la capa de destino (las secciones censales con población) cuando el centroide de sus polígonos se encuentra dentro de la distancia definida desde la entidad fuente (los equipa-mientos).

Para determinar qué método es más conveniente para realizar los análisis, se muestra como ejemplo uno de los equipamientos analizados, correspondiente a los hospitales, y los resultados cartográficos que se obtienen por ambos procedimientos (Figura 2).

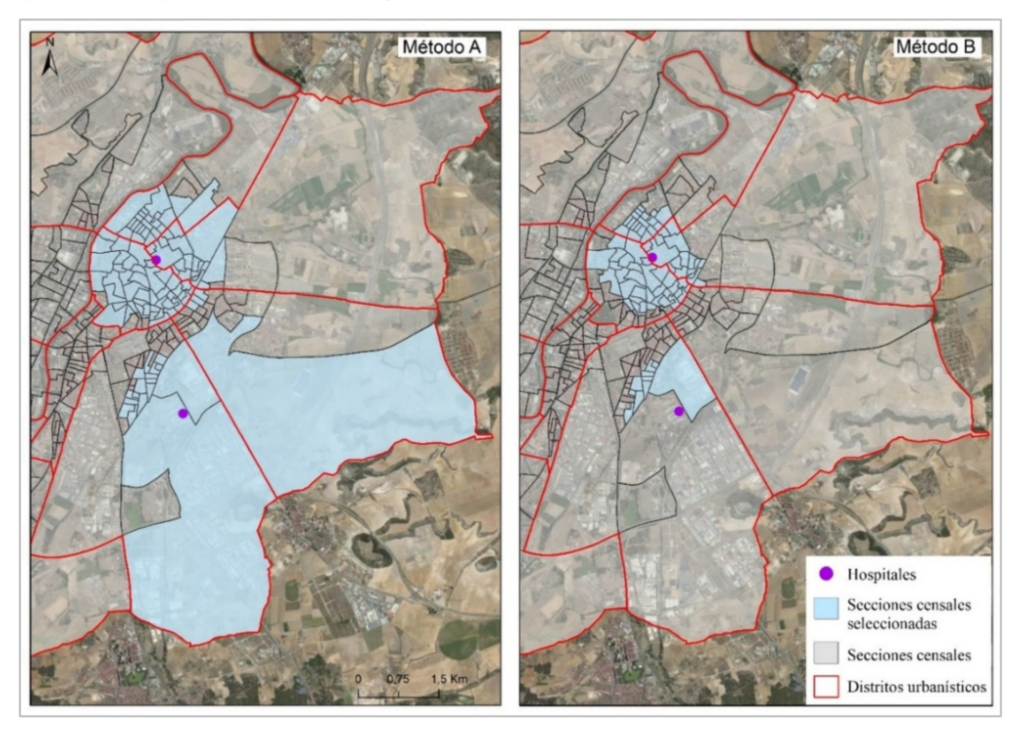


Figura 2. Comparación entre los métodos A y B.

Como se puede observar en la Figura 2, el método A selecciona un mayor número de secciones censales, mientras que el método B es más restrictivo. Este último está basado en la distancia desde los hospitales, en el caso del ejemplo mostrado, a los centroides de las secciones censales. El hospital situado en la zona más meridional de la ciudad se encuentra en una sección censal extensa, que no queda seleccionada, dado que su centroide supera la distancia establecida de 1.000 metros hasta el equipamiento. Sin embargo, es evidente que el hospital analizado sí presta servicio a la población de esa sección censal, por lo que este método pierde fiabilidad en polígonos extensos y con formas irregulares.

Para el análisis cuantitativo, se extraen los datos correspondientes a las secciones censales que cumplen las condiciones de distancia respecto a los equipamientos. El objetivo de este proceso es conocer cuánta población total de cada grupo de edad se encuentra cubierta por cada categoría de equipamientos analizados. Este proceso se ha realizado para los dos métodos descritos anteriormente, y ayudará a discernir cuál de ellos es más adecuado.

Los grupos quinquenales de edad se han agrupado de modo que la comparación entre las dos macro-

tablas (una para cada método) resulte más sencilla y pueda ofrecer una rápida idea de la estructura de la población a la que da servicio cada equipamiento.

Esta clasificación, dado que no se dispone de datos desagregados para cada año, se ha generado intentando respetar los grupos de edad que se corresponden con los periodos vitales de la población, sobre todo manteniendo los límites difusos entre niñez, adultez y vejez. Así, se ha obtenido la siguiente clasificación: 0-14 años;15-29 años; 30-49 años; 50-64 años; 65-79 años; más de 80 años.

Estos resultados servirán para realizar gráficos comparativos de población y determinar la estructura de los habitantes a los que dan servicio los equipamientos analizados.

Tabla 2. Población cubierta por los servicios básicos analizados

Método A (están dentro de)							**Método B (centroide)**						
Grupos de edad / **Servicio básico**	**0-14**	**15-29**	**30-49**	**50-64**	**65-79**	**Más de 80**	Grupos de edad / **Servicio básico**	**0-14**	**15-29**	**30-49**	**50-64**	**65-79**	**Más de 80**
Mercados	8.975	11.741	22.561	20.844	21.039	10.375	**Mercados**	6.772	8.725	17.209	15.73	16.381	8.103
Centros educativos							**Centros educativos**						
Educación Infantil y Primaria	32.619	37.654	71.373	63.918	53.522	23.521	Educación Infantil y Primaria	21.814	27.576	49.329	46.752	41.961	18.94
Educación Secundaria	33.477	38.341	73.032	65.137	54.366	24.013	Educación Secundaria	25.289	31.44	57.018	53.197	46.993	21.207
Centros sanitarios							**Centros sanitarios**						
Centros de salud	28.434	34.82	62.852	59.037	49.016	22.342	Centros de salud	19.43	25.275	44.456	42.276	38.356	17.6
Hospitales	11.431	14.213	27.274	23.612	22.45	11.39	Hospitales	7.796	9.894	19.092	16.621	16.589	8.564
Centros sociales	34.082	39.986	73.997	67.678	55.627	24.373	**Centros sociales**	27.251	33.704	61.554	57.686	50.746	22.436
Centros deportivos	31.965	37.22	69.104	62.999	51.462	22.174	**Centros deportivos**	26.582	31.717	57.095	53.588	44.446	18.422
Centros culturales	30.569	35.241	67.177	60.281	49.956	22.492	**Centros culturales**	20.063	25.384	45.575	42.945	37.404	17.376
Puntos de recogida de residuos	34.916	40.256	75.547	68.209	55.943	24.499	**Puntos de recogida de residuos**	27.516	33.58	61.41	56.961	49.186	21.835
Transporte público	34.916	40.256	75.547	68.209	55.943	24.499	**Transporte público**	32.152	37.749	70.808	64.25	54.218	23.682

Por tanto, se comprueba que, si se aplica el método A, la población cubierta por los equipamientos aumenta (Tabla 2). Esto sucede porque al tratar las secciones censales como polígonos, en el momento que alguna parte de esa sección censal se encuentre dentro la distancia indicada, será seleccionada en su conjunto y, por tanto, se incluirá toda su población correspondiente. No sucede lo mismo con el método B, ya que al estar basado en el centroide resulta más restrictivo.

De este modo, se continua con la hipótesis precedente, al ser más conveniente la elección del método A, que se adecúa mejor a las características de la ciudad de Valladolid. Esto es debido a que la selección por localización mediante el método B plantea ciertos problemas dependiendo de la forma de la sección censal analizada: en secciones censales pequeñas y regulares, el centroide considerado se ajusta bastante bien con el centro geométrico del polígono; mientras que en secciones censales extensas e irregulares el centroide no coincide con el centro geométrico debido a esas formas desiguales. Estas variaciones pueden introducir sesgos en el momento de realizar la selección por localización mediante el método B, dado que se toma la distancia desde el equipamiento al centroide establecido, por lo que, si se supera el intervalo definido, no se seleccionará esa sección censal, incluso en casos en los que el equipamiento se encuentre dentro de ella.

En conclusión, se ha considerado que el método óptimo tanto en términos cartográficos como cuantitativos es el método A, que considera la distancia entre las entidades de la capa fuente y la capa de destino a través de la generación de áreas de influencia, dado que es el tipo de selección por localización que plasma mejor la realidad existente. Será por tanto con este método con el que se continuará el trabajo.

3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados específicos obtenidos para cada tipo de equipamiento público analizado, para determinar cuáles cubren mejor las necesidades de los habitantes de Valladolid.

3.1. Mercados

En la ciudad de Valladolid hay cinco mercados municipales, que se localizan mayoritariamente en el centro urbano, por lo que la cobertura para el conjunto de la ciudad (31,9%) es muy escasa. Sin embargo, al haber analizado únicamente la cobertura de los mercados públicos, este dato no indica que haya un acceso deficiente a los servicios de compra de alimentación, dado que la ciudad cuenta con una excelente red de hipermercados, supermercados y comercios de proximidad dedicados a la alimentación. El 34,5% de las secciones censales tienen cubierto el acceso a mercados, lo que supone el 31,9% de la población. Los distritos 0 y 1 cuentan con una elevada cobertura, mientras que los distritos 5,6,7 y 9 no cuentan con ningún

mercado público y la cobertura es 0. EL porcentaje medio de población cubierta en cada sección censal es del 35,8%.

3.2. Centros educativos

Cabe reseñar en primer lugar que los Centros de Educación Infantil y Primaria analizados aglutinan tanto los centros públicos como los concertados y las escuelas infantiles municipales (87 equipamientos en total), con una distancia de 300 metros. La cobertura alcanza el 95% de las secciones censales, por lo que presentan una distribución muy equitativa en el conjunto urbano, incluso en zonas más alejadas del centro de la ciudad. El porcentaje medio de población cubierta en cada sección censal es del 42% y el 94,4% de la población de la ciudad está dentro de la distancia recomendada por la AUE. Los distritos 1, 2, 4, 7 y 8 logran una cobertura del 100% de la población atendida; y en el resto del distrito las cifras son adecuadas (entre el 74,1% de población en el distrito 9 y el 98,8% del distrito 0.

Los Centros de Educación Infantil y Primaria y las escuelas infantiles dan servicio a niños de entre 0 y 12 años, por lo que se ha analizado específicamente la cobertura para el grupo de edad de 0 a 14 años. Así, la población infantil a menos de 300 metros de los colegios supone el 93,4% del total de la población de este grupo de edad en la ciudad. Por otra parte, un 94,5% de la población entre 30 y 49 años está cubierta por estos equipamientos, siendo el grupo potencial en edad de tener hijos en España ya que, de acuerdo con los datos de la última Encuesta de Fecundidad (Instituto de Estadística de España, 2018), la edad media de fecundidad en España es de 31 años, y casi el 80% de la población de 25 a 29 años aún no ha tenido descendencia.

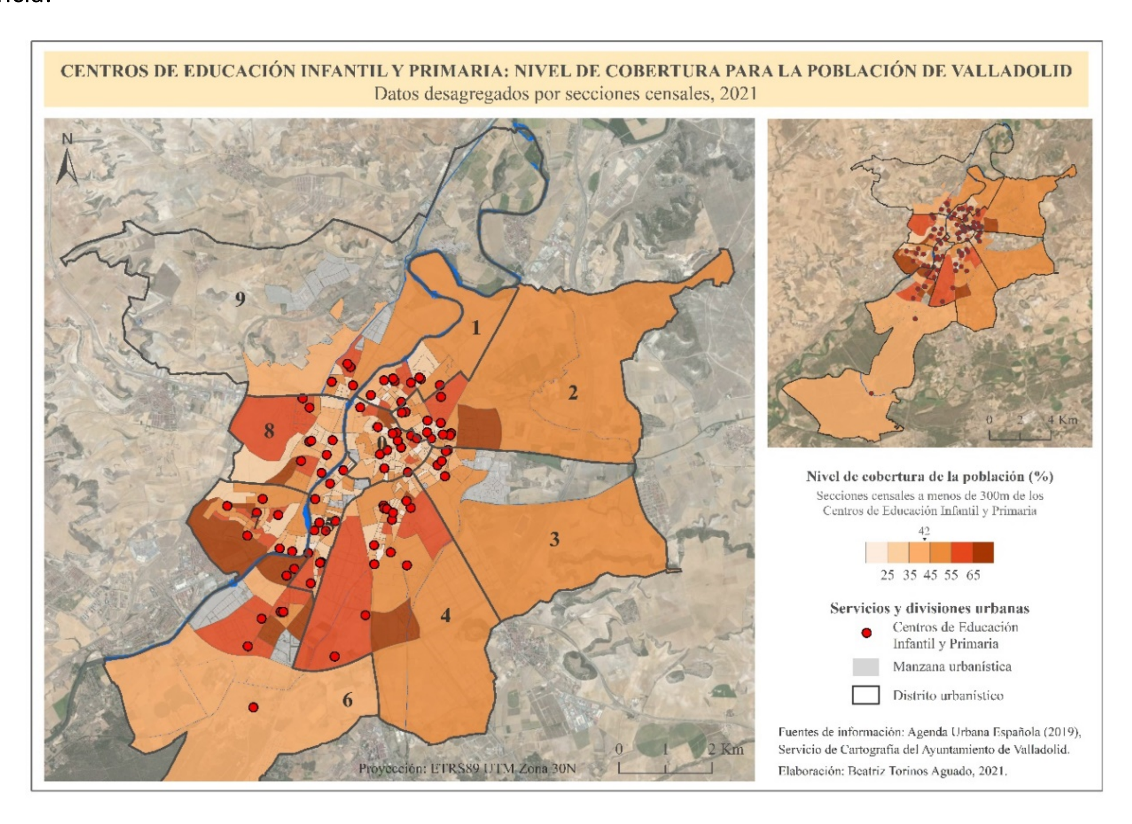


Figura 3. Centros de Educación Infantil y Primaria: nivel de cobertura. Elaboración propia.

Los Centros de Educación Secundaria incluyen institutos públicos y colegios concertados que ofertan también enseñanzas de Educación Secundaria Obligatoria (ESO) y Bachillerato. Son 55 los equipamientos analizados. El 98,9% de las secciones censales se encuentran cubiertas, lo que supone una cobertura máxima para el 96,3% de la población. Al considerar una distancia mayor, 500 metros frente a 300 metros, los datos son más elevados. En todos los distritos se alcanza el 100% de cobertura, exceptuando el distrito 9, donde esta cifra se reduce considerablemente, 50,9%, y donde casi la mitad de sus secciones censales no tienen cobertura, siendo uno de los porcentajes más bajos (37,2%) para toda la ciudad (41,4%). Particularmente se ha analizado el grupo de edad de 0 a 14 años y de 15 a 19 años, mostrando que un 95% de la población, para ambos grupos de edad, está cubierta en las distancias establecidas por la AUE.

3.3. Centros sanitarios

Los centros sanitarios están compuestos por dos categorías diferenciadas: centros de salud y hospitales. Valladolid cuenta únicamente con dos hospitales situados en los distritos 2 y 4, con una llamativa ubicación, dado que ambos equipamientos se localizan en la margen izquierda del río Pisuerga. En cualquier caso, el umbral de 1.000 metros que recomienda la AUE plantea que el 36,8% de la población y el 40% de las secciones censales tiene acceso a hospitales. La cobertura media de los hospitales se sitúa en un 35,7%. Quedan de manifiesto grandes contrastes espaciales entre los barrios de la ciudad, ya que los distritos 0 (92%), 1 (88,8%) y 2 (75,9%) cuentan con unos niveles muy elevados de cobertura, frente a los distritos 5,6,7,8 y 9 que no tienen acceso en la distancia de 1.000 metros. El 24,7% de la población entre 30 y 49 años cuenta con acceso a los hospitales, mientras que la población mayor de 80 años y los menores de 14 años presentan una cobertura aproximada de apenas el 10% de su población.

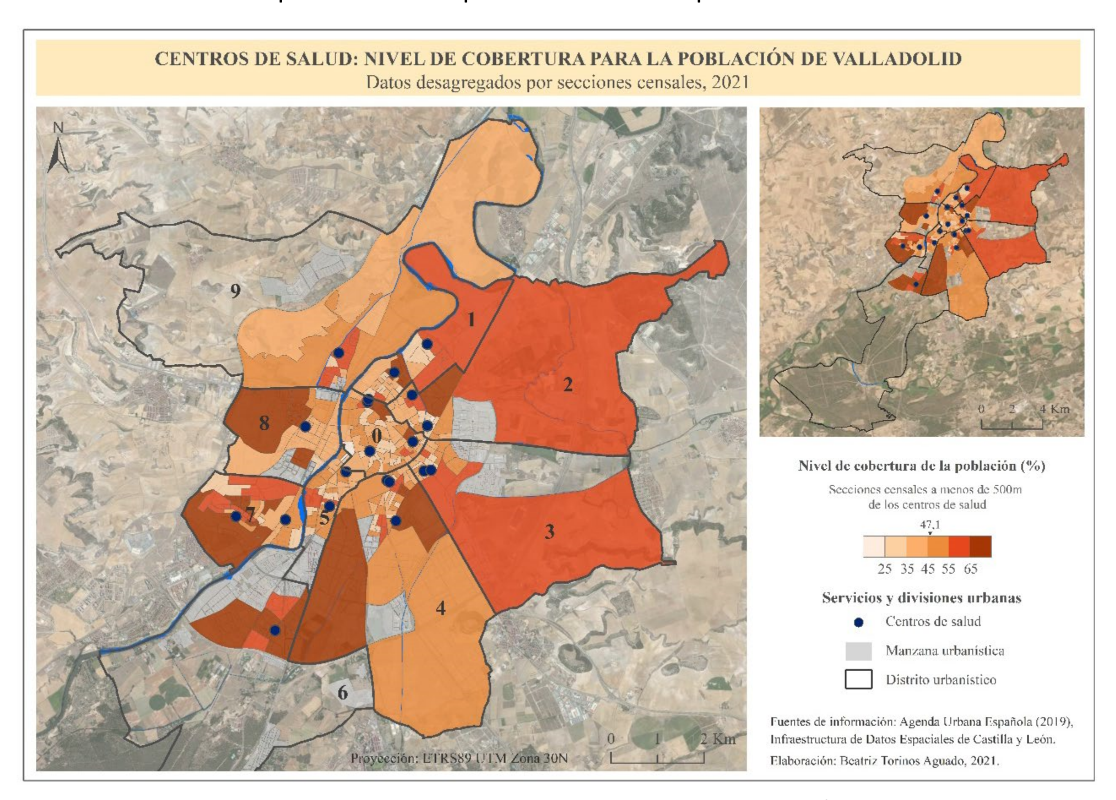


Figura 4. Centros de salud: nivel de cobertura. Elaboración propia.

Los equipamientos que se engloban dentro de los centros de salud son los ambulatorios, centros de especialidades y los puntos de atención continuada, sumando un total de 20 instalaciones que se encuentran en el espacio urbano compacto en su mayoría, con mayor presencia en el centro y este de la ciudad. Los centros de salud dan cobertura al 87,2% de secciones censales y al 85% del total de población (Figura 4). Los distritos 0, 1 y 7 alcanzan máxima cobertura; mientras que el distrito 6 es el que peor cobertura presenta, con el 56%, aunque de forma interna en este distrito existe una gran variabilidad entre secciones censales. La presencia de centros de salud es mayoritaria en aquellas zonas que cuentan con población en edades avanzadas, lo que permite que el 91,2% de la población de más de 80 años está cubierta por estos equipamientos en las distancias recomendadas. El grupo de edad de 0 a 14 años alcanza una cobertura del 81,4% de su población.

3.4. Centros sociales

Los centros sociales incluyen los Centros de Acción Social, Centros de Personas Mayores, Centros de Igualdad, Oficina de Atención al Inmigrante, Servicios a la Dependencia, el Comedor Social Municipal y las asociaciones vecinales. En total son 90 los centros sociales analizados, que se distribuyen por todo el espacio urbano, lo cual permite que todos los distritos dispongan de una cobertura del 100% excepto los distritos 4 y 5, que superan, no obstante, el 90%. Cabe destacar la presencia de centros sociales en zonas vulnerables de la ciudad como algunos espacios de los distritos 1, 2, 3 y 4 donde existen bajos ingresos. En conjunto, el 99,2% de las secciones censales y el 98,8% de la población de la ciudad está cubierta a una distancia de 500 metros.

3.5. Centros deportivos

Los centros deportivos municipales que se han tenido en cuenta son los polideportivos, estadios, piscinas y pistas deportivas. En total son 90 instalaciones que se localizan, en su mayoría, en los alrededores de la zona central de la ciudad, aunque se distribuyen de forma homogénea en el espacio urbano consolidado. El 91,8% de la población y el 91,9% de las secciones censales están cubiertas en la distancia recomendada de 500 metros.

Las necesidades de espacio que requiere este tipo de equipamientos provocan que buena parte se ubiquen alrededor del centro urbano y en espacios alejados de este. Cabe destacar la mayor presencia de estos equipamientos en los distritos 5, 6, 7 y 8; barrios de reciente urbanización que en su planificación han incorporado el desarrollo de centros deportivos. Todos los distritos se encuentran cubiertos prácticamente en su totalidad a excepción del distrito 0, donde el 66% de su población tiene un centro deportivo accesible a menos de 500 metros, lo cual es, sin embargo, una cifra aceptable.

Para las personas de 30 a 49 años se alcanza una cobertura del 91,5% de la población, y las comprendidas entre los 50 a 64 años y de 65 a 79 años presentan asimismo el 92,4% y 92,0% respectivamente. El 91,5% de la población infantil, de 0 a 14 años, tiene acceso los equipamientos deportivos; cifra que aumenta ligeramente hasta el 92,4% para la población joven de 15 a 29 años respectivamente. Estas cifras presentan una situación favorable para fomentar la práctica de actividad física y avanzar en un modelo de ciudad más saludable.

3.6. Centros culturales

Los centros culturales que se han considerado en Valladolid son fruto de la unión de dos categorías de la AUE, “cultural” y “entretenimiento”. Únicamente se analizan los servicios de gestión municipal (bibliotecas, centros cívicos y centros de iniciativas ciudadanas, sin incluir ningún establecimiento privado. En total, hay 35 equipamientos culturales que ofrecen cobertura al 90% de las secciones censales y aglutinan el 88,8% de la población. Estos equipamientos se distribuyen mayoritariamente en el centro urbano, destacando una elevada cobertura en los distritos 1, 2 y 3 (100%), frente al distrito 6 (55,5%). La media de cobertura global para los centros culturales en cada sección censal es del 43,1%.

Por su parte, el 91,8% de la población mayor de 80 años tiene acceso a los centros culturales a distancias inferiores de 500 metros. A su vez, el 89% de la población de 30 a 49 años dispone de acceso a centros culturales, cifra similar al 87,5% de la población joven de 15 a 29 años.

En resumen, aunque es limitada la presencia de centros culturales en la ciudad, su localización favorece una adecuada cobertura media a la población.

3.7. Puntos de recogida selectiva de residuos

Esta categoría incluye contenedores de papel y cartón, vidrio y aceite, no encontrando datos para envases de plástico y residuos orgánicos. La AUE establece una distancia de 100 metros, por lo que es necesario que, si se quiere dar servicio a toda la ciudad, el número de puntos de recogida debe ser muy elevado. Suman un total de 2.162 equipamientos, que se distribuyen por toda la ciudad, pero con una destacada densidad en el centro urbano. Todas las secciones censales de la ciudad cuentan con una cobertura plena, aunque se encuentran diferencias entre el este, que incluye los distritos 1, 2, 3, 4 y el distrito 0 -centro urbano-, con valores medios para cada distrito inferiores a la media total de la ciudad, y la zona oeste, cuyos distritos, exceptuando el 5, superan la media de la ciudad en más de 10 puntos, lo que puede ir ligado al desarrollo urbano de esas zonas y a la población que en ellas reside.

3.8. Transporte público

El transporte público municipal de Valladolid está conformado por una red de autobuses urbanos, por lo que para determinar la cobertura de la población respecto a este equipamiento se han analizado las 575 paradas de autobús de la ciudad. Señalar que 31 paradas se ubican fuera del límite municipal de Valladolid, aunque se han tenido en cuenta en el análisis ya que dan servicio a población que reside dentro del municipio. Bajo la distancia considerada de 300 metros, estas paradas ofrecen una cobertura idónea a la población de la ciudad (100%) y todas las secciones censales disponen de este servicio.

El distrito 4 cuenta con un mayor número de paradas de autobús (el 21,4%), dado que la combinación de zonas residenciales con zonas industriales hace que la accesibilidad a las paradas de autobús deba ser elevada. El distrito 6, el más periférico de la ciudad, es a su vez el segundo con mayor número de paradas (14,3%), lo que supone una buena planificación del servicio de transporte público para favorecer la ac-

cesibilidad al resto de la ciudad y lograr una movilidad más sostenible.

Figura 5. Paradas de autobús: nivel de cobertura. Elaboración propia.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La valoración de políticas urbanas a través de análisis espacial es una práctica habitual para cuantificar sus resultados teóricos y/o reales; diagnóstico que se ve enriquecido y que aparece habitualmente combinado con una representación gráfica y cartográfica de los resultados como soporte para la toma de decisiones en la planificación urbana. En este trabajo se ha analizado una política de escala nacional como es la Agenda Urbana Española (AUE), que incorpora en su diseño y planteamientos los preceptos de la Nueva Agenda Urbana (Hábitat III) y de la Agenda Urbana para la Unión Europea.

Un tema de debate fundamental es la idoneidad de los resultados obtenidos en relación con la selección de equipamientos públicos analizados. El hecho de no incluir otras posibles infraestructuras está fundamentado por la disponibilidad de información, pero también por los indicadores que propone la AUE, generales para las ciudades españolas y para una escala de ciudad, no de detalle. Este análisis no considera los equipamientos privados, y, en caso de haberlo hecho, habría mejorado los resultados de algunos espacios urbanos, sobre todo en los barrios periféricos, aunque no tanto en el centro urbano ante la excelente cobertura que en líneas generales ya presentan.

Consideramos que el tamaño medio de Valladolid en el contexto urbano español, y también europeo, permite aportar luz a la aplicabilidad de las nuevas políticas urbanas como herramienta de planificación urbana eficiente y bien orientada. Específicamente, los resultados han presentado una situación muy buena para la cobertura de la mayor parte de equipamientos analizados, si bien las zonas centrales de la ciudad presentan por lo general los mejores niveles de cobertura frente a los barrios más periféricos. Todos los servicios públicos analizados, a excepción de los mercados municipales, cuentan con más de un 75% de población cubierta en el conjunto de la ciudad. Esta realidad observada se corresponde con el modelo habitual de ciudad española y mediterránea donde, de facto, existe un modelo urbano mayoritariamente sostenible, al menos desde la perspectiva de la equidad y la accesibilidad a los servicios básicos.

Por su parte, el trabajo ha enfatizado el papel de la cartografía temática como herramienta clave para conocer en profundidad la realidad urbana y como método idóneo para la toma de decisiones por parte del conjunto de actores urbanos. Gracias al análisis espacial realizado se ha podido cuantificar la población cubierta por los diferentes servicios municipales, así como determinar los espacios urbanos que presentan deficiencias o desigualdades respecto a otras zonas de la ciudad. Con ello, se proponen las siguientes inter-

venciones en cuanto a la localización de nuevos equipamientos:

- Reforzar la provisión de equipamientos públicos en las zonas alejadas del espacio urbano compacto, en especial en los distritos 5, 7 y 9.
- Integrar los equipamientos públicos en zonas de transición entre áreas residenciales y de actividades económicas, mejorando la cobertura de sus habitantes, como en el distrito 4.
- Aprovechar las extensas áreas sin urbanizar, presentes en diferentes secciones censales, para instalar nuevos equipamientos y mejorar la cobertura de la población aledaña al tiempo que se planifican las nuevas construcciones de modo que permitan la posterior incorporación y reconversión de los equipamientos en función de las necesidades de los residentes y de los cambios de la estructura demográfica.

Estas medidas ayudarán a reducir la distancia de la población a los equipamientos, disminuyendo la dependencia del vehículo privado, favoreciendo la movilidad sostenible. Además, la correcta combinación de estas medidas permitirá adecuar la ciudad a los estándares de la AUE, realizando un esfuerzo para paliar las desigualdades presentes en ciertas zonas y logrando que la totalidad de la población tenga un acceso equitativo al conjunto de equipamientos municipales básicos de la ciudad.

5. BIBLIOGRAFÍA

Agenda Urbana Española (2019). Indicadores de seguimiento y evaluación. Disponible en: https://www.aue.gob.es/

De la Cruz-Mera, Á. (2019). La Agenda Urbana Española. *Ciudad y Territorio, Estudios Territoriales*, 51(202), 675-686.

Escolano-Utrilla, S., López-Escolano, C. y Pueyo-Campos, Á. (2021). Movilidad residencial intraurbana de los españoles y extranjeros en Zaragoza (España): diferentes espacios, distintos procesos. *Investigaciones Geográficas*, 76, 75-95. https://doi.org/10.14198/ INGEO.1839

García Martín, F. M. (2019). La configuración de las periferias en las ciudades intermedias españolas durante el siglo XX: Málaga, Murcia y Valladolid. *Ciudades*, 22, 45-70. https://doi.org/10.24197/ciudades.22.2019.45-70

Hernández Aja, A. (2000). Barrios y equipamientos públicos, esencia del proyecto democrático de la ciudad. *Documentación Social*, 119, 79-94.

Jacobs, J. (1961). *The Death and Life of Great American Cities*. New York, Random House, primera edición.

Martínez Navarro, J. M., García González, J. A. y Escudero Gómez, L. A. (2020). Las ciudades medias de España y sus coronas en el siglo XXI (2000-2017): dinámica demográfica y desarrollo inmobiliario. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 12, e20190202. https://doi.org/10.1590/2175-3369.012.e20190202

Organización de las Naciones Unidas, ONU (2012). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Objetivo 11: lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. Disponible en: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/

Organización Mundial de la Salud (2020): Manifiesto de la OMS a favor de una recuperación saludable de la COVID-19. Disponible en: https://www.who.int/es/news-room/feature-stories/detail/who-manifesto-for-a-healthy-recovery-from-covid-19

Pueyo-Campos, A., Postigo-Vidal, R., Arranz-López, A., Zúñiga Antón, M., Sebastián-López, M., Alonso-Logroño, M. P. y López-Escolano, C. (2016). La Cartografía Temática: Una Herramienta para la Gobernanza de las Ciudades. Aportaciones de la Semiología Gráfica Clásica en el Contexto de los Nuevos Paradigmas Geográficos. *Revista de Estudios Andaluces*, 33(1), 84-110. http://dx.doi.org/10.12795/rea.2016.i33.05

Rabanaque Hernández, I., Pueyo Campos, Á., López Escolano, C., Salinas Solé, C., Arranz López, A., Zúñiga Antón, M. y Sebastián López, M. (2014). Modelos de representación de la información padronal: de la cartografía temática clásica al uso de mallas de gran escala. *Mapping*, 166, 24-30.

Aplicaciones y desarrollos basados en TIG (SIG, teledetección, cartografía y otras geotecnologías)

Infraestructuras de Datos Espaciales, desarrollos geoinformáticos, aplicaciones en la nube…



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 574-583

Uncovering spatio-temporal micromobility patterns using the Time Geography framework

D. Arias Molinares[1], J.C. García Palomares[1], G. Romanillos[1], J. Gutiérrez[1]

[1] Departamento Geografía, Universidad Complutense. C. Prof. Aranguren s/n, 28040 Madrid.

Daniar02@ucm.es, jcgarcia@ghis.ucm.es, gustavro@ucm.es, javiergutierrez@ghis.ucm.es

ABSTRACT: In the past ten years, cities have experienced the burst of micromobility services as they offer a flexible transport option that allows users to cover short trips or the first/last mile of longer trips. Despite their impact on mobility and the fact that they are offering a cleaner, more environmentally friendly alternative to private cars, few efforts have been devoted to studying their spatio-temporal travel patterns from the Time Geography framework. Our research aggregates, counts and analyses GPS records with information related to the origin of trips collected by three of the most important micromobility operators in the city: BiciMAD, which is Madrid's public, station-based, bike-sharing system, and Movo and Muving which are private, dockless moped-style scooter-sharing operators. Movo also operates dockless scooters (kick-style) which enables comparisons between three different modes (bikes, mopeds and scooters). The trip origins (points) are processed and visualised using space-time cubes (STC) and then spatially analysed in a GIS environment. Results help to identify the most important areas of the city (central ones) and time of the day (middays and afternoons), helping us to detect the most important areas of the city in terms of generation of micromobility trips (departures). Our research is replicable in other cities and could offer insights for both, transport planners and micromobility operators. Findings could better inform urban planning and transportation policy. Additionally, operators could be able to optimise vehicle redistribution and maintenance/recharging tasks, reducing congestion and increasing efficiency.

Keywords: Time Geography, micromobility, space-time cubes, shared mobility.

1. INTRODUCTION

In the past decade, the introduction of the sharing economy has impacted many economic sectors, including transportation. Consequently, urban mobility is currently undergoing an unprecedented revolution. New services are offered each day and users have access to multiple transport options, radically changing their travel behaviours. These changes are being enabled by the rapid development of information and communication technologies (ICTs) along with the improved Geographical Information Systems (GIS), the emergence of new data sources and the advanced processing capabilities using programming, which are all elements that help researchers in their task to capture the new dynamics and visualise new opportunities to study human behaviour. Individuals now move using the latest location-aware technology, which requires data that fits personal needs and thus, the elementary questions related to geospatial data such as "what?", "where?" and "when?" are becoming incredibly relevant. This explains the revival and grown interest in Hägerstrand's Time Geography.

The time-geographic framework proposed by (Hagerstrand 1970) at the end of the sixties provided a useful mean for exploring human activity. However, when this model was introduced, the options to create graphics were limited to manual methods. Therefore, despite the usefulness of Time Geography, only few studies actually implemented its visualisations up to mid-1990s (M. P. Kwan 2004). Today's software advanced capabilities and the increasing availability of geo-referenced data collected by global positioning systems (GPS) offer high spatio-temporal granularity enabling, more than ever before, the operationalisation and implementation of time-geographic constructs in multiple research areas like crime, public health and traffic safety.

Nevertheless, there are still few studies found that used Time Geography notions to conduct spatio-temporal analysis of micromobility services. These recently introduced micromobility services are changing

the way people move and thus, they deserve more research. The now more accessible micromobility GPS data has opened a line of research with many opportunities for exploration. One of them, scarcely developed in scientific literature, is the analysis of micromobility travel patterns. Micromobility have been defined as the short-term access to low-speed shared vehicles like bikes and scooters (moped and kick-style ones), according to the user's needs and convenience, instead of requiring vehicle ownership (Lazarus et al. 2020; Shaheen and Cohen 2019). In the past decade, micromobility services have gained attention as they have impacted urban mobility by offering a flexible transport option capable of avoiding road congestion, reducing the required parking space, lowering noise/air pollution, since all vehicles are hybrid electric/electric, and last but not least, encouraging intermodality with mass transit. Our study aims at filling a research gap found in studies related to the exploration of micromobility spatio-temporal travel patterns using GPS origin point records and Time Geography. More specifically, using GPS records from three different shared modes (bikes, mopeds and scooters), we intend to identify the most important hot spots, analyse trip generations according to the time of the day and finally, be able to identify the most important areas of the city in terms of micromobility departures (origins). We believe these types of studies are necessary and more feasible nowadays with new sources of massive data. Transport authorities and micromobility operators could feed their decision-making processes with insights obtained from understanding spatio-temporal patterns from a space-time perspective.

2. STUDY CONTEXT, DATA AND METHODOLOGY

2.1. Study context

The selection of Madrid is of special interest as the city has been known as one of Europe's top living labs for shared mobility, allowing its residents to be familiar with the emerging transport options, especially micromobility services. The multiple and varied shared mobility supply, along with a solid public transport system, a great land use diversity and high population/employment densities make Madrid an appropriate area for these new services to burst. In 2019, the shared fleet was estimated in more than 20.000 vehicles (Arias-Molinares and García-Palomares 2020; Bernardo 2019; Granda and Sobrino 2019). These services are usually supported by mobile applications where their clients register and locate the vehicles. In the case of Madrid, all micromobility services offer electric vehicles and can be station-based or dockless models. For the purpose of our research, we have stablished collaboration agreements with two of the most important micromobility operators in Madrid to access anonymised trip data: Movo and Muving. In the case of BiciMAD, the data is publicly shared through an open data portal. Station-based services like BiciMAD, have designated locations where users pick and leave the vehicles at, while dockless services, like Movo and Muving, offer more flexibility as the vehicles can be picked/returned at any location within a geographic area (also known as geofence). We obtained datasets for Movo and Muving covering the months from the last semester of 2019 (from June to December), thus the same period was downloaded for BiciMAD in order to cover the same timeframe for all the services evaluated. The datasets included information related to the location (xy coordenates) of the trip orogin and the exact time when it was made. BiciMAD is Madrid's public bike-sharing system operative since 2014 and it is currently being managed by Municipal Transport Company (EMT), with around 75.000 subscribers, 264 stations with a total of 2.900 bikes (Ayuntamiento de Madrid 2019). Secondly, Movo is a moped-style scooter-sharing (also known as moto-sharing) and scooter-sharing service launched in 2018 and it operates 500 mopeds and 1.400 scooters (Polo and González 2019). Finally, Muving is a moped-style scooter-sharing operator that manages 755 mopeds. The company was operative in Madrid from 2018 to 2020 (Arias-Molinares et al. 2021) (see Figure 1).



Figure 1. Micromobility services analysed in the study. From left to right: 1) Station-based bike-sharing (BiciMAD bikes), 2 and 3) dockless moped-style scooter-sharing (Movo and Muving mopeds) and 4) dockless scooter-sharing (Movo scooters). Source: own elaboration.

2.2. Methodology

2.1.1. Processing and cleaning the datasets

The data processing workflow covered entering, cleaning, transforming, and outputting the final valid datasets (using Python vs. 3.8). For all the datasets, the initial cleaning process involved eliminating those observations (origin points) with trip distance or time equal to zero (erratic data). A second cleaning stage consisted of filtering datasets by making certain assumptions, such as not considering those origins of trips that lasted less than a minute or more than 2 hours or trips that covered less than 100 meters or more than 70 km. This was necessary in order to eliminate unrealistically long-distance trips (probably GPS errors) and redistribution trips (as only BiciMAD tagged them). Thus, we cleaned BiciMAD and Movo datasets by trip time and in the case of Muving we cleaned the dataset by both trip time and distance.

After obtaining the cleaned datasets for all services (bikes, mopeds and scooters), we decided to separate the databases according to different scenarios based on the day of the week: weekdays (from Mondays to Fridays) and weekends (Saturdays and Sundays). We also determined to work with the origin point counts for an average day. Therefore, we divided the weekdays databases by 120 (5 days * 4 weeks * 6 months = 120 weekdays in a six-month period) and the weekends databases by 48 (2 days *4 weeks * 6 months = 48 weekends in the same period).

2.1.2. Understanding spatio-temporal travel patterns through Time Geography

Once our cleaned and averaged datasets were obtained, we visualise origins (departures) using Hägerstrand's Time Geography. As was mentioned before, the STC model consists of a cube with, on its base a representation of geography (along the x- and y-axis), while the cube's height represents time (z-axis). In our case, geography is represented according to a hexagonal grid (with centroid-to-centroid distance equal to 250m) that covers the study area, while the height is representing each hour of the day. A 250m-sided hexagonal grid was determined based on similar research as this size ensures that each cell contains several city blocks. Following this scheme, when creating the space time cubes, we aggregate each origin (departure point) to the correspondent grid cell that contained it and to the particular bin (height representing each hour of the day) when the trip was initiated. STCs were then created for both: weekdays and weekends. This step results in the creation of six cubes: bikes-weekdays, bikes-weekends, mopeds-weekdays, mopeds-weekends, scooters-weekdays and scooters-weekends, which are the input layers for the rest of the analyses, performed with ArcGIS Pro vs. 2.8.3. After aggregating all the origin points to their corresponding hexagonal grids and bins, we counted them (sum) for the whole day (all hours for 2D maps) and for each hour (hourly for 3D maps). With the STCs created, the first analysis intends to capture micromobility's different dynamics with two complemental visualisations: daily (2D maps) and hourly (3d maps) behaviour. For 2D visualisations, we make a map representing the total amount of departures (origin points) by hexagon according to the day of the week and mode. The second 2D map visualises the percentage of times that each hexagon was a hot spot using the Hot Spot Analysis based on the Getis-Ord Gi*. This statistic measures the degree of clustering for either high or low values. The resultant z-scores and p-values reports where features (in this case hexagons) with either high or low values are clustering spatially. This method analyses each feature within the context of neighbouring features, for which we determined a 500m distance band, as it will include all the neighbours surrounding each hexagonal cell and based on similar previous research (García-Palomares, Gutiérrez, and Mínguez 2015; Barros, Moya-Gómez, and Gutiérrez 2020). In order to be statistically significant hot spot, the feature analysed will have a high value and be surrounded by other features with high values (Gutiérrez, Cardozo, and García-Palomares 2011). In the case of 3D visualisations, two STCs are created. The first one, shows hourly departures (origin points) by hour, while the other represents the hot and cold spot results by hour. For both 3D visualisations, and due to space reasons, we determined to show results at certain relevant hours (instead of all hours), which helped to understand and highlight important dynamics throughout the day: 00 hrs (majority of people at home or nightlife activities), 08 hrs (rush peak AM hour), 14 hrs (lunch and midday activities) and 19 hrs (rush peak PM hour and nightlife activities) (as we can observe and justified by Figure 6).

3. RESULTS

In general, we appreciate differences between the three modes and between each mode in the two scenarios: weekdays and weekends. Table 1 summarises the main characteristics of the datasets analysed. As it can be seen, bikes are the most important shared mode with the highest departures (origin points) (10.928 and 6.491 departures in weekdays and weekends correspondingly). To grasp bikes' importance, we can state that for every person that took a moped or scooter to travel during weekdays in 2019, there were

approximately 4 and 24 people respectively, taking a bike. For weekends however, the difference is slightly reduced as for every person taking a moped or scooter, there were approximately 3 and 18 people taking a bike respectively. When identifying the days of the week with the highest origin point counts, bikes are mostly used on Tuesdays while the dockless modes are mostly used towards the weekends on Thursdays (in the case of scooters) and Fridays (for mopeds). Preferred hours are also different for station-based and dockless services as BiciMAD's peak hour is at 17hrs while in the case of both dockless services the peak shows at 19hrs. These preferred days and hours for the different services during weekdays, could suggest that station-based bikes are mostly being used for commuting or conducting rutinary activities as their prime time is when the week starts and especially in the PM rush hour when people usually are returning home, while the dockless services could be more related to other leisure/recreational activities as their prime time is on later hours and they are mostly used towards the weekends, which supports what has been found in similar research (McKenzie 2019b; Ji et al. 2020). When analysing the weekends behaviour, we observe that for all the three modes, the highest departure counts are found on Saturdays and bikes and mopeds are preferred for an hour later (18 and 20 hrs respectively) while scooters' preference is maintained at 19hrs. Hence, we can infer that scooters' behaviour is very similar disregarding the day of the week, while bikes and mopeds vary from weekdays to weekends. This is also noticeable when analysing the coefficients of variation which describe how the services behave during the day, showing a more stable pattern for BiciMAD (Coeff of 57 on weekdays and 39 on weekends) against a more unstable pattern showed for mopeds (Coeff of 62 and 49) and scooters (Coeff of 79 and 73). Interestingly, the coefficient of variation in the three modes are lower for weekends, meaning that they behave with less variations along these days.

Table 1. Descriptive characteristics of the datasets analysed for micromobility services. Source: own elaboration.

	Characteristic	*Bikes*	*Mopeds*	*Scooters*
Weekdays	Total departures	1.311.372	329.094	55.242
	Departures on an average day	10.928	2.742	460
	Departures in peak day of week	274.499 (Tuesday)	71.729 (Friday)	11.733 (Thursday)
	Departures in peak hour	94.740 (17 hrs)	26.410 (19 hrs)	4.944 (19 hrs)
	Average departures by hour	455	114	19
	Standard Deviation	260	71	15
	Coefficient of variation	57	62	79
	Max	790	220	41
	Min	43	9	1
Weekends	Total departures	311.589	111.427	17.746
	Departures on an average day	6.491	2.321	370
	Departures in peak day of week	167.337 (Saturday)	60.899 (Saturday)	9.356 (Saturday)
	Departures in peak hour	19.784 (18 hrs)	8.270 (20 hrs)	1.500 (19 hrs)
	Average departures by hour	271	97	15
	Standard Deviation	105	48	11
	Coefficient of variation	39	49	73
	Max	412	172	31
	Min	79	17	2

Figure 2 represents the absolute and percentual distribution of departures along the course of an average day. During weekdays, the three modes show three peaks associated with AM and PM rush hours and lunch or midday activities. However, some differences are noticed. The first one is that bikes seen to be used in earlier hours (at 07, 13 and 17 hrs) compared to dockless services (at 09, 14-15 and 18-19 hrs). Secondly, bikes are used in the morning almost in the same way as they are used the afternoon, which supports that the service has a more homogenous trip distribution in relation to dockless services. Dockless services' trips increase towards the afternoon (especially scooters) showing a more unbalanced usage throughout the day. In the case of weekends, the AM rush hour peak disappears, and trips increase towards the afternoon in all modes, especially scooters and mopeds from 19 to 20 hrs. A new peak is seen though for all three modes in early morning hours from 00 to 01 hrs, which is closely related to nightlife activities during weekends.

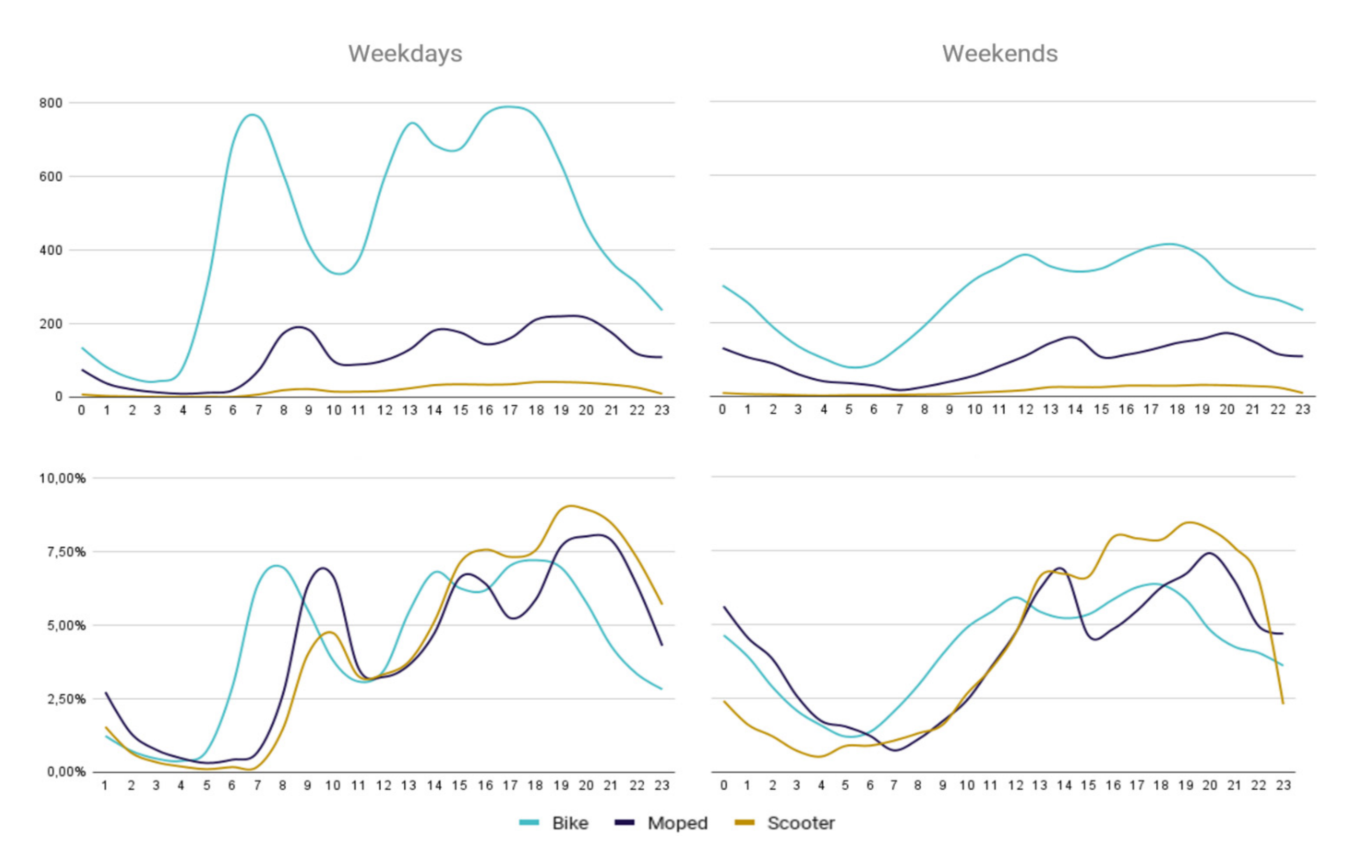


Figure 2. Absolute (top) and percentual (bottom) distribution of departures by mode over the course of an average day. Source: own elaboration.

3.1. Understanding spatio-temporal travel patterns

3.1.1. From a 2D perspective

Figure 3 shows daily behaviour for departures (adding the number of origin points in all hours) by mode and according to the day of the week. The first noticeable difference is how each service's departures behave spatially. With bikes being a station-based model, they show a higher scale (ranging from cells that have from 8 to 215 departures on an average day) which means a more intense usage of space as origin points are aggregated only in those hexagons where bike stations fall at. On the contrary, dockless services allow users to start their trip at any location within the service's geofence, which causes a more dispersed usage of space as origin points are aggregated in more cells (ranging from 1 to 22 departures on an average day). Moreover, the map yields the important differences between weekdays and weekends. During weekdays, trip departures cover a more extensive area, although none of them, with the exception of mopeds, extends beyond the M-30 highway urban area (central area of the city). When comparing both scenarios (weekdays and weekends), we see more trips starting from high employment areas of the city during weekdays (i.e., north-south axe of Paseo la Castellana), as was also found in (Forest 2019; Lazarus et al. 2020). During weekends however, these work-related activity areas are mostly turned off in terms of micromobility trip departures and they rather tend to be more concentrated around the city core centre, especially, in the case of bikes. With most users not having to work or conduct rutinary activities, weekends' behaviour is more active at the city core centre where most of the recreational/leisure/commercial areas are located as well as the most touristic and visited areas, also similar to findings in (Yang et al. 2020; McKenzie 2019a).

In general, origin points for the three modes seem to be quite related with transport infrastructure and this relationship is maintained for both, weekdays, and weekends. Transport intermodal stations are very attractive and could be considered relevant infrastructures in terms of micromobility services, supporting findings from (Duran-Rodas, Chaniotakis, and Antoniou 2019; Romanillos 2018; Teixeira and Lopes 2020). Central districts (i.e., Chamberi and Salamanca) show to be important no matter the day of the week for both dockless services. These areas of the city concentrate mixed-residential land uses that hold a varied offer of activities along the day and through the whole week. While, in the case of bikes, a close relationship between the spatial distribution of departures with the location of cycling infrastructure (i.e., segregated cycling lanes)

can be observed, supporting what was also found by (Romanillos et al. 2018; Talavera-García and Pérez-Campaña 2021).

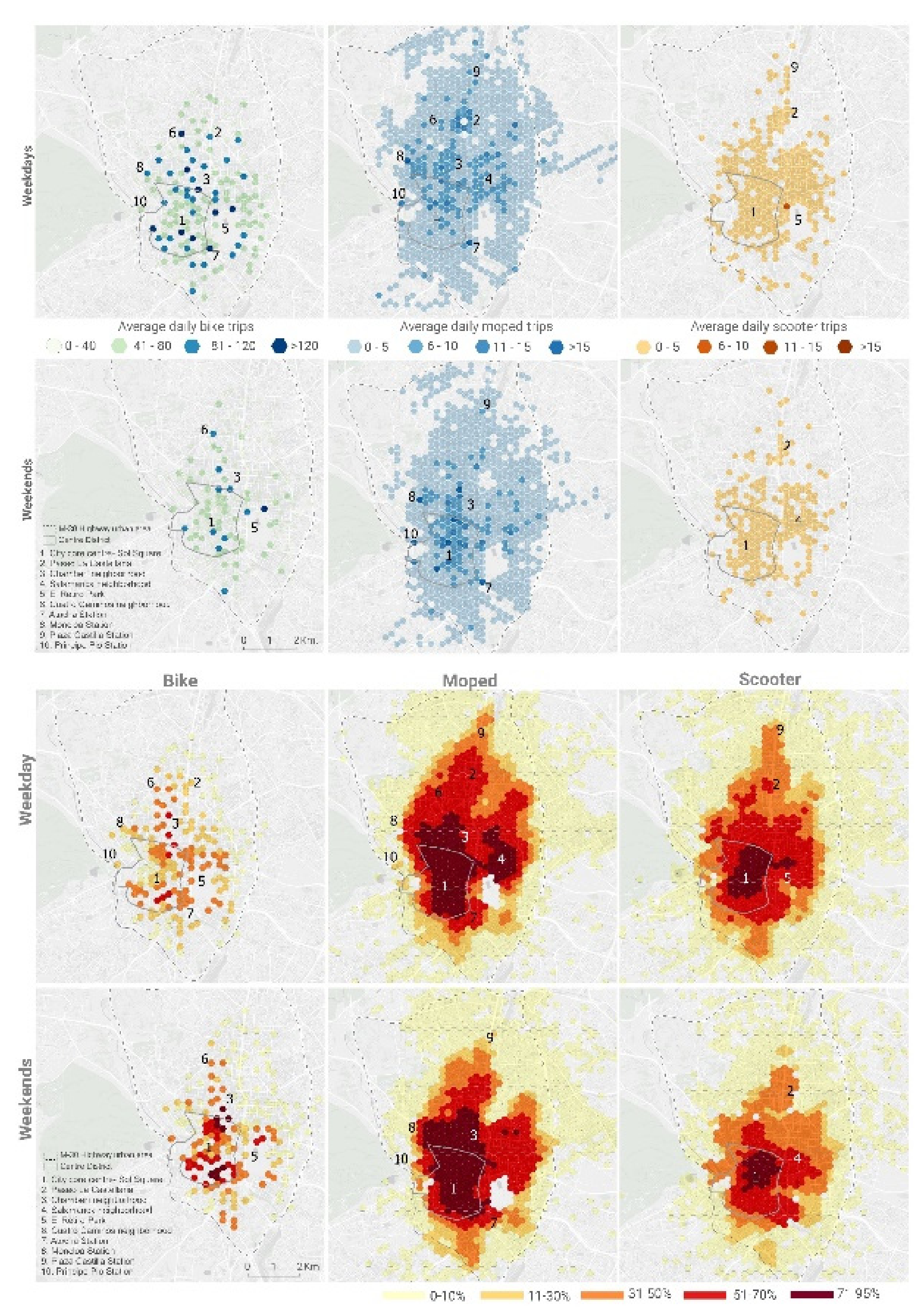


Figure 3. Daily departures by mode and according to the day of the week (2D). Source: own elaboration.

In the previous figure we also show the percentage of times that each location (hexagon) is a hot spot (with p-value 0,05) which enables us to quickly identify the most important areas of the city regarding micromobility departures (origin points). The general pattern shows that trips start from a more extensive area during weekdays, covering those areas with high concentration of workplaces/office sites. On the contrary, departures on weekends tend to be concentrated mainly around the city core centre for all three modes. Mopeds represent the mode with the highest hot-spot coverage area during weekdays and especially during weekends, which means its users are departing from many different locations of the city, while in the case of the other two modes (bikes and scooters), users seen to start their trips in more particular areas. Both maps allow the identification of the city core centre and its surroundings as areas with more vitality in terms of micromobility departures during weekdays and weekends. This is related to the fact that these areas hold great employment and residential zones, a consolidated public transport and cycling infrastructure as well as a varied offer of commercial and recreational activities supporting findings with (Yang et al. 2020). Furthermore, we take the advantage of Hägerstrand's Time Geography constructs and visualise how departures distribute across space and along different hours of the day, which enables a better understanding of urban dynamics in a more granular manner. Figure 4 shows the same analysis made in 2D maps, but now including the time dimension as height. Results clearly illustrate some important differences between weekdays and weekends dynamics. For all three modes, there are two main differences. The first one related to rutinary activities (work/education or other) that take place during the morning rush hours, as at 08:00 hrs on weekends, trips drastically decrease (most people are free from rutinary activities), while at this same time on weekdays, many trips are starting, and especially coming from residential zones. The second difference is related to nightlife activities that take place mostly during late night and early hours, as we can see the trips at 00:00 hrs considerable higher in weekends and mostly starting from locations at the city core centre where most entertainment places are concentrated. From space-time cubes, we can also infer that afternoon hours (from lunch on) are the most profitable ones for micromobility operators, as departures are maintained in high counts no matter the scenario (weekday or weekend) and they seem to be better distributed around the city urban area (greater coverage). In the case of weekdays, we can clearly see the relevance that hold some of the most important office/workplace areas of Madrid along the north-south axe of Paseo La Castellana where a high number of departures are observed around 14:00 hrs (lunch) and 19:00 hrs (return to home).

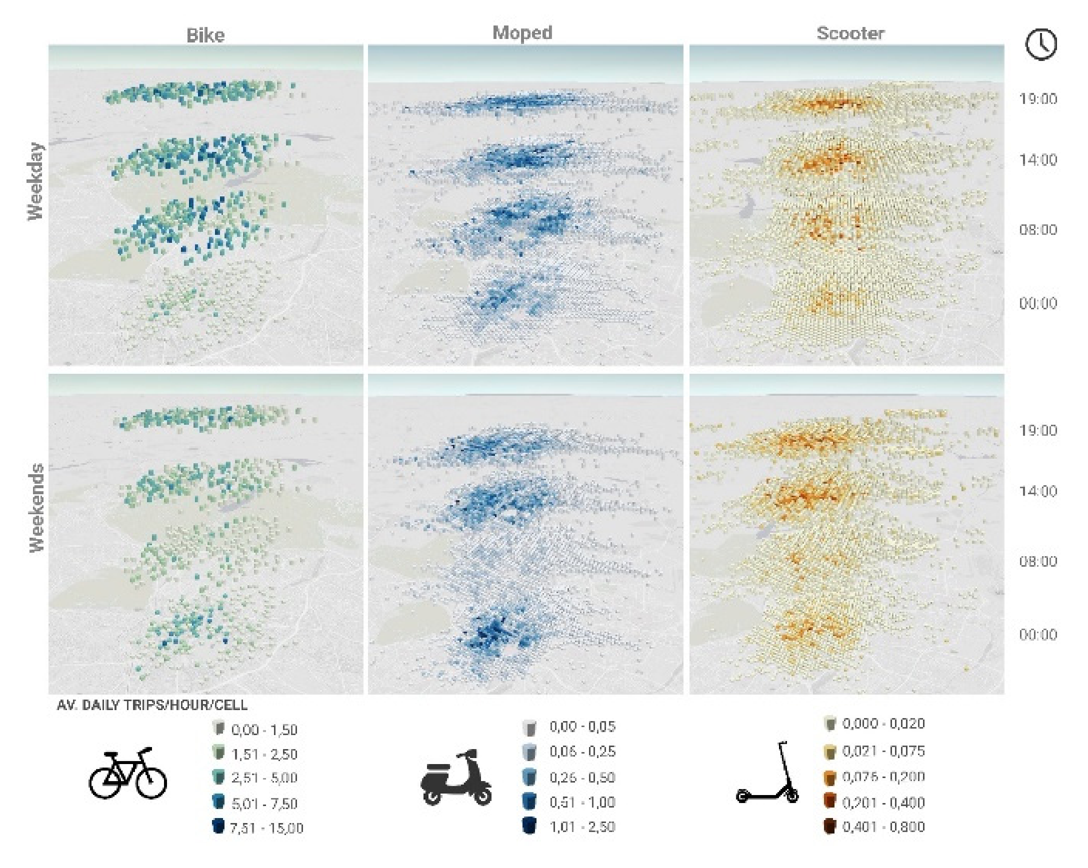


Figure 4. Spatio-temporal distribution of micromobility departures on an average day. Source: own elaboration.

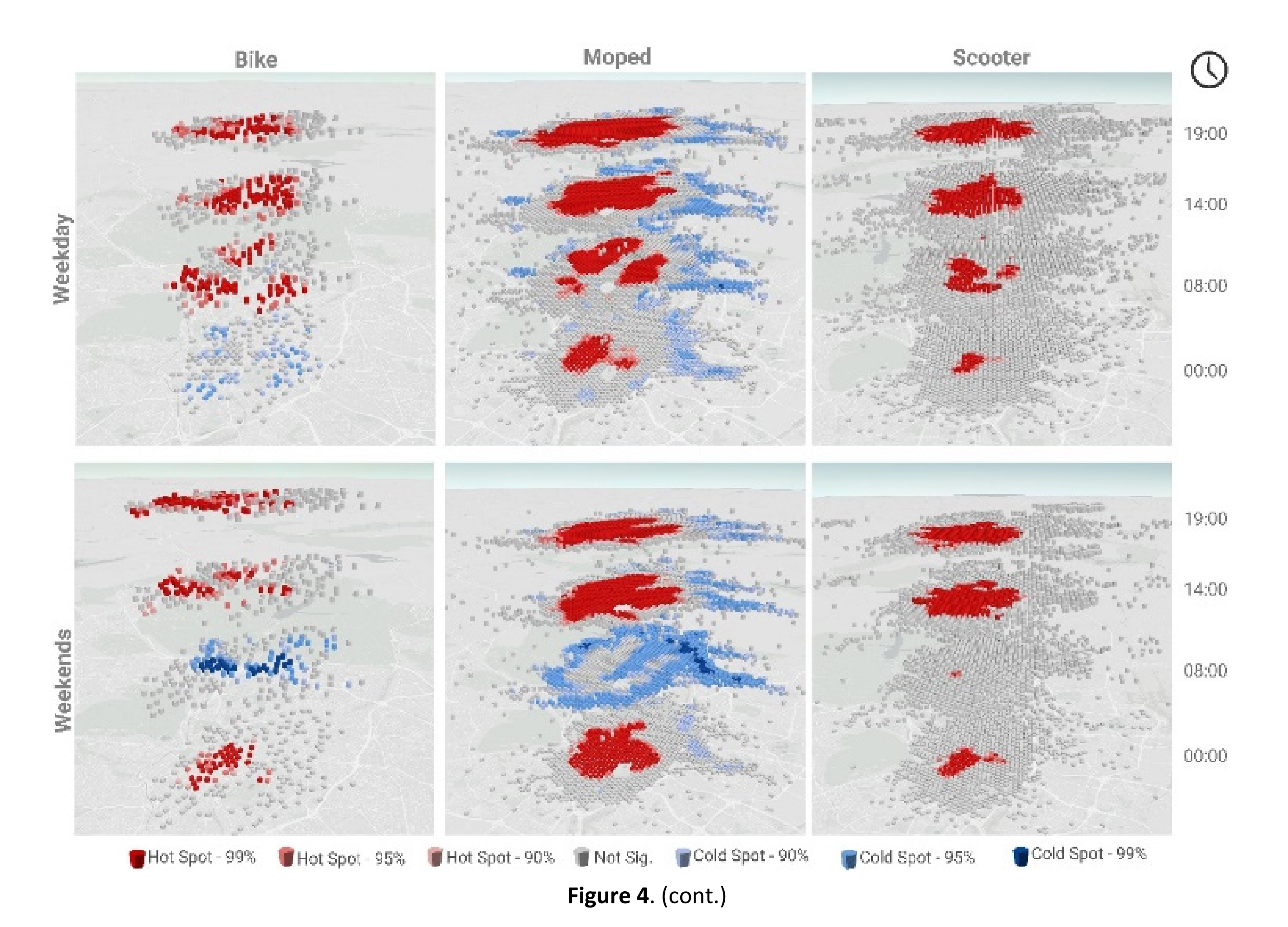


Figure 4. (cont.)

Hot and cold spot results support and emphasise the previous findings. There are few hot spots at 08:00 hrs on weekends and few hot spots at 00:00 hrs on weekdays. Additionally, from the hot spots results we infer that afternoon hours are the most profitable time of the day, as they cover a greater surface in the city, disregarding the day of the week, even though they still tend to concentrate more to the city core centre on weekends.

4. CONCLUSIONS

This study has showed that the exploration of spatio-temporal micromobility travel patterns can be better understood within the Time Geography framework. Our results show that 2D maps for daily behaviour and 3D maps for hourly behaviour can be complemental analyses that allow to identify similar space-time behaviours. One of our main findings is that bikes are the most important analysed shared mode in the city as it shows high departure counts throughout the day while mopeds and especially scooters gain importance towards the afternoon. In the case of Madrid, we have found that central (midday) and late afternoon hours (from 18 to 20 hrs) are the most profitable time for micromobility operators, as hot spots are more homogeneously distributed. In addition, the analyses performed allowed us to identify the areas of the city with the highest vitality and attractiveness in terms of micromobility departures. These areas concentrate residential, mixed-residential, commercial, and work-related land uses that are closely linked to an intense usage during the entire day (morning and afternoon). The proposed methodology could be implemented in any city and could offer operators and authorities useful insights regarding the hourly-changing dynamics of shared services, which are often not completely captured from the 2D perspective. Our aggregation approach was to add each origin point to the hexagonal grid (xy-axis) and bin (z-axis) that contained it, according to the specific location and time of the starting point and then totalising (adding) all the origin points (departures) by hexagon over the course of the day (daily) or hourly. This helped us to understand the spatial and temporal distribution of the origins of micromobility trips, identifying the most important areas and times of the day. For policy-oriented decision processes, authorities should try to understand the different dynamics according to the day of the week and hourly patterns. Promoting dense, mixed-residential land use, offering micromo-

bility infrastructure as segregated cycle lanes and parking places in hot spot areas could increase the importance of this shared mobility modes. Future research could try to include more operators to analyse a better sample and conduct regression models to better explain the relationship between the types of locations (clusters) and the different land uses.

5. REFERENCES

Arias-Molinares, D. & García-Palomares, J.C. (2020). Shared Mobility Development as Key for Prompting Mobility as a Service (MaaS) in Urban Areas: The Case of Madrid. *Case Studies on Transport Policy* 8 (3): 846–59. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.05.017.

Arias-Molinares, D., Romanillos, G., García-Palomares, J.C. & Gutiérrez, J. (2021). Exploring the Spatio-Temporal Dynamics of Moped-Style Scooter Sharing Services in Urban Areas. *Journal of Transport Geography* 96, 103193. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103193.

Ayuntamiento de Madrid. (2019). *Portal de Datos Abiertos Del Ayuntamiento de Madrid*. Bicimad. 2019.

Barros, C., Moya-Gómez, B. & Gutiérrez, J. (2020). Using Geotagged Photographs and GPS Tracks from Social Networks to Analyse Visitor Behaviour in National Parks. *Current Issues in Tourism* 23 (10): 1291–1310. https://doi.org/10.1080/13683500.2019.1619674.

Bernardo, E. D. (2019). City Snapshot: Mobility-as-a-Service in Madrid. *Intelligent Transport,* 2019.

Duran-Rodas, D., Chaniotakis, E. & Antoniou, C. (2019). Built Environment Factors Affecting Bike Sharing Ridership: Data-Driven Approach for Multiple Cities. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. https://doi.org/10.1177/0361198119849908.

Forest, B. (2019). *A Scoot, Skip, and a JUMP Away: Learning from Shared Micromobility Systems in San Francisco*. California. https://doi.org/10.17610/T6QP40.

García-Palomares, J.C., Gutiérrez, J. & Mínguez, C. (2015). Identification of Tourist Hot Spots Based on Social Networks: A Comparative Analysis of European Metropolises Using Photo-Sharing Services and GIS. *Applied Geography* 63: 408–17. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.08.002.

Granda, M. & Sobrino, R. (2019). *Madrid, Capital Del Vehículo Compartido Con 21.600 Unidades*. CincoDías, 2019.

Gutiérrez, J., Cardozo, O.D. & García-Palomares, J.C. (2011). Transit Ridership Forecasting at Station Level: An Approach Based on Distance-Decay Weighted Regression. *Journal of Transport Geography* 19 (6): 1081–92. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.05.004.

Hagerstrand, T. (1970). What about People in Regional Science? In *European Congress of the Regional Science Association*, 7–21.

Ji, Y., Ma, X., He, M., Jin, Y. & Yuan, Y. (2020). Comparison of Usage Regularity and Its Determinants between Docked and Dockless Bike-Sharing Systems: A Case Study in Nanjing, China. *Journal of Cleaner Production* 255. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120110.

Kwan, M. P. (2004). GIS Methods in Time-Geographic Research: Geocomputation and Geovisualization of Human Activity Patterns. *Geografiska Annaler*, Series B: Human Geography 86 (4): 267–80. https://doi.org/10.1111/j.0435-3684.2004.00167.x.

Lazarus, J., Pourquier, J.C., Feng, F., Hammel, H. & Shaheen, S. (2020). Micromobility Evolution and Expansion: Understanding How Docked and Dockless Bikesharing Models Complement and Compete – A Case Study of San Francisco. *Journal of Transport Geography* 84: 102620. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.102620.

McKenzie, G. (2019a). Spatiotemporal Comparative Analysis of Scooter-Share and Bike-Share Usage Patterns in Washington, D.C. *Journal of Transport Geography* 78: 19–28. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.05.007.

McKenzie, G. (2019b). Urban Mobility in the Sharing Economy: A Spatiotemporal Comparison of Shared Mobility Services. *Computers, Environment and Urban Systems*. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101418.

Polo, F. & González, A. (2019). Cabify Integra Las Motos y Los Patinetes Eléctricos de MOVO En Su App. *El Referente*. 2019. https://elreferente.es/tecnologicos/cabify-integra-las-motos-y-los-patinetes-electricos-de-movo-en-su-app/.

Romanillos, G. (2018). *The Digital Footprint of the Cycling City: GPS Cycle Routes Visualization and Analysis.* Doctoral Thesis, Universidad Complutense de Madrid (UCM).

Romanillos, G., Moya-Gómez, B., Zaltz-Austwick, M. & Lamíquiz-Daudén, P.J. (2018). The Pulse of the Cycling City: Visualising Madrid Bike Share System GPS Routes and Cycling Flow. *Journal of Maps* 14 (1): 34–43. https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1438932.

Shaheen, S. & Cohen, A. (2019). *Shared Micromoblity Policy Toolkit: Docked and Dockless Bike and Scooter Sharing.* California. https://doi.org/10.7922/G2TH8JW7.

Talavera-García, R. & Pérez-Campaña, R. (2021). Applying a Pedestrian Level of Service in the Context of Social Distancing: The Case of the City of Madrid. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(21), 11037. https://doi.org/10.3390/ijerph182111037

Teixeira, J.F. & Lopes, M. (2020). The Link between Bike Sharing and Subway Use during the COVID-19 Pandemic: The Case-Study of New York's Citi Bike. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 6: 100166. https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100166.

Yang, L., Zhang, F., Kwan, M., Wang, K., Zuo, Z. & Xia, S. (2020). Space-Time Demand Cube for Spatial-Temporal Coverage Optimization Model of Shared Bicycle System : A Study Using Big Bike GPS Data. *Journal of Transport Geography* 88 (September): 102861. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102861.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 584-591

Sobre algunas fuentes de datos de telefonía móvil para el estudio geográfico de la movilidad en España

S. Escolano-Utrilla[1], S. Esteban-Rodríguez[1]

[1] Departamento de Geografía y Ordenación del territorio, Universidad de Zaragoza.

severino@unizar.es, sesteban@unizar.es

RESUMEN: La movilidad es una práctica socioespacial transversal a otras múltiples prácticas sociales y, por ello, una dimensión clave para comprender las trasformaciones sociales, económicas, culturales o territoriales de las sociedades contemporáneas. Las nuevas tecnologías de la información han puesto a disposición de los investigadores nuevas masas de datos digitales con información espacial *(spatial Big Data),* útiles para el estudio geográfico de la movilidad, obtenidos a partir del seguimiento de la localización de terminales de telefonía móvil y del registro de la localización de diversas operaciones realizadas con medios electrónicos. Los nuevos métodos y datos presentan ventajas respecto de los modos tradicionales de obtención y análisis de datos de movilidad, pero también plantean nuevos desafíos para su creación y uso en tareas de investigación. Aquí se exponen las características más importantes de dos fuentes de datos de telefonía móvil –una publicada por Instituto Nacional de Estadística y otra por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana– muy valiosos para el estudio geográfico de la movilidad en España y se desarrolla un ejemplo de recuperación de los datos necesarios para un estudio territorial de la movilidad en Aragón, mediante el programa *Orange* diseñado para procesar archivos de datos muy grandes *(Data mining)*.

Palabras-clave: movilidad, big-data, telefonía móvil, España, Orange.

1. INTRODUCCIÓN

La *movilidad* es una práctica socioespacial que atraviesa múltiples dimensiones del desarrollo social. Este carácter transversal convierte a la movilidad en objeto y enfoque de estudio importante para comprender la evolución e interacciones entre procesos sociales, económicos, territoriales y culturales, entre otros. El estudio de la movilidad humana ha conformado, en las últimas tres décadas, un ámbito científico relevante en el que convergen diversas disciplinas con el enfoque común del «paradigma de la movilidad» (Sheller & Urry, 2006; Urry, 2012). El «giro hacia la movilidad» *(mobility turn),* especialmente de las ciencias sociales, es coherente con la importancia política, socioeconómica, ambiental y estratégica que el movimiento de personas, información, capital, bienes y servicios ha adquirido en las sociedades contemporáneas.

Los estudios de movilidad utilizan datos que expresan determinadas características de los movimientos individuales de las personas, como origen y destino, frecuencia, motivos de los viajes, etc., agregados en unidades espaciales administrativas (distritos, municipios, provincias, comunidades autónomas) o delimitadas *ad hoc*. El método habitual de recogida de información consiste en aplicar una encuesta, generalmente bastante extensa, a una muestra de la población objeto de estudio. Este procedimiento es costoso en tiempo y recursos y no facilita la actualización de los datos con la frecuencia adecuada a los cambios rápidos de la movilidad, especialmente en los espacios urbanos. Los últimos datos publicados de la «Encuesta de Movilidad de las Personas Residentes en viviendas familiares, sus características y sus determinantes en España» (Movilia) proporcionan información obtenida por encuesta sobre las pautas de movilidad cotidiana (2006) y a larga distancia (2007) (M. y A. U. Ministerio de Transportes, n.d.).

Las nuevas tecnologías de la información aplicadas al conocimiento y gestión de los movimientos de objetos y de personas han permitido renovar los métodos y medios de obtención y análisis de los datos de movilidad. A partir del seguimiento de la localización de terminales de telefonía móvil y de los lugares de operación con otros medios electrónicos (tarjetas bancarias y de transporte, uso de redes sociales, etc.) y de otros datos complementarios, se han formado grandes bases de datos de flujos de movilidad que contienen información espacial *(Spatial Big Data*) (Osorio-Arjona & García-Palomares, 2017; Vannoni et al., 2020). El

uso de datos así obtenidos se ha multiplicado en investigaciones con diferentes objetivos (Bisanzio et al., 2020; Liu et al., 2016; Moya-Gómez et al., 2021) y para estudiar la relación de la movilidad con las variaciones de la incidencia y propagación de la COVID-19, así como los efectos de las restricciones para el control de la pandemia en la intensidad y modos de la movilidad (Pászto et al., 2021; Romanillos et al., 2021; Sadowski et al., 2021; Wang & Yamamoto, 2020; Xiong et al., 2020).

El uso eficiente y útil de los datos generadas por estos métodos para estudiar la movilidad presenta ventajas y dificultades. Por una parte, se mejora la frecuencia de actualización de los datos, que además se distribuyen y analizan con medios digitales, se amplían, potencialmente, los ámbitos de investigación y se reducen los costes en relación con los métodos tradicionales de encuesta. Por otra, se plantean nuevos desafíos para estructurar datos fragmentados en unidades significativas de información y para organizar, recuperar, analizar y visualizar información de grandes bases de datos *(data mining)* (Osorio-Arjona & García-Palomares, 2017).

En España se dispone de archivos públicos de datos de movilidad formados a partir del seguimiento de la localización de terminales de telefonía móvil, publicados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) (Instituto Nacional de Estadística, n.d.) y por el *Observatorio de la Movilidad* del Ministerio de Transporte Movilidad y Agenda Urbana (MITMA) (M. y A. U. (MITMA) Ministerio de Transportes, n.d.). Esta comunicación tiene por objetivos resumir las características de estos datos y proponer un flujo de trabajo con el programa *Orange* (Demsar et al., 2013) para seleccionar, transformar y visualizar datos de los archivos disponibles en el repositorio del MITMA, que puedan utilizarse para el estudio geográfico de la movilidad en Aragón.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS DATOS DE MOVILIDAD «INE» Y «MITMA»

La información sobre la movilidad de los «Estudios de movilidad a partir de la telefonía móvil» (INE) se ha derivado del registro de los cambios de localización de una muestra del 78,7% de los teléfonos móviles de España. La unidad espacial de información mínima es el «área de movilidad INE»; los datos se refieren a varios días consecutivos seleccionados por su representatividad en la movilidad cotidiana o estacional, así como durante el período de confinamiento general decretado para controlar la expansión de la COVID-19 (15 marzo 20 de junio de 2020).

Cada área de movilidad debe superar los 5.000 habitantes empadronados. Cada municipio entre 5.000 y 50.000 habitantes constituye un área de movilidad. Cuando los municipios no alcanzan este valor, se agrupan los de la misma provincia en celdas de entre 5.000 y 50.000 habitantes, mientras que las ciudades mayores de 50.000 habitantes se desagregan en barrios o distritos mayores de 5.000 habitantes. En total, se han delimitado 3.214 áreas de movilidad en 2019. Cada terminal se ha adscrito a una única celda de residencia que es aquella en la que se encuentra durante más tiempo entre las 10:00 y 06:00 horas de los cuatro días observados; esta información se ha contrastado con datos históricos de 60 días. El área de destino de la movilidad es aquella en la que se encuentre la terminal, al menos, durante cuatro horas en la franja de 10:00 a 18:00 horas en dos de los cuatro días observados. Entre las áreas de destino se incluye también la de residencia. El método no permite identificar en todos los casos el área de destino. Los flujos publicados son los de 25 personas o más (Instituto Nacional de Estadística, 2020, 2021) (tabla 1).

Los antecedentes del «Estudio de la movilidad con Big Data» (EM-1 a EM-4) se encuentran en un proyecto que el Ministerio de Fomento llevó a cabo en 2017. Este consistió en un estudio piloto de la movilidad interprovincial a partir de registros de telefonía (Ministerio de Fomento, 2019) y constituye el punto de partida metodológico del trabajo de 2020. El objetivo del proyecto piloto era caracterizar la movilidad en días promedio y en días en los que esta muestra un comportamiento diferenciado a lo largo de los meses de julio, agosto y octubre de 2017. En el estudio se utilizó información de conexiones a antenas de telefonía de más de 14 millones de líneas móviles. Esta información, al igual que en el estudio de 2020, se complementó con información de usos del suelo, relevante para identificar las actividades que se asocian a cada desplazamiento; con datos de aforos, para desplazamientos por carretera, y de rutas y demanda para el transporte público. Para el con-junto de España, se incluyeron los viajes con itinerarios de más de 50 km; además, en las provincias de Madrid, Barcelona, Alicante y Vizcaya, los viajes entre 10 y 50 km.

El tratamiento de la información para generar los flujos de movilidad es complejo y consta de diversas fases que van desde el proceso de toma de datos a la publicación de los resultados. En cumplimiento de la normativa sobre protección de datos, el tratamiento incluye procesos de *anonimización* y agregación de la información para evitar que un usuario individual pueda ser identificado. Los resultados de desplazamientos del estudio piloto se encuentran segmentados por modo de transporte -carretera, ferrocarril, marítimo y

aéreo-, diferenciando, en los desplazamientos por carretera inter autonómicos, entre vehículo público y privado. En el estudio piloto se trabajó únicamente con 59 zonas -provincias, ciudades autónomas e islas- para la generación de las matrices de viajes y etapas. Estas cuentan con información segmentada por variables tales como residencia, franja horaria y actividad.

Tras la experiencia del estudio piloto, el MITMA ha elaborado el «Estudio de la movilidad con Big Data», planteado como un medio para analizar los cambios en la movilidad producidos por la crisis de la COVID-19. La metodología es similar a la del proyecto piloto, aunque cuenta con algunas mejoras como el periodo de generación de resultados, que se ha reducido. Para la obtención de los datos de este estudio se ha utilizado una muestra de más de 13 millones de líneas móviles y otra información complementaria (usos del suelo, población, redes de transporte y otra información sociodemográfica y de demanda de transporte) para analizar todos los viajes de más de 500 m con origen y destino en el territorio nacional. Los datos están agregados en unidades espaciales de dos niveles denominadas «zonas MITMA», nivel «municipios») (2.205) y «distritos» (2.805). Los datos diarios se han recogido durante varios meses (M. y A. U. Ministerio de Transportes, 2021) (Tabla 1). Para agregar en «zonas MITMA» los municipios más pequeños se sigue el procedimiento utilizado en el estudio del INE citado arriba.

La información de ambas fuentes difiere en los contenidos temáticos y en la resolución espacial y temporal de los datos, por lo que los objetivos de cada investigación condicionarán, en cada caso, el uso adecuado de los mismos. Los «Estudios de movilidad a partir de la telefonía móvil (INE)» poseen una resolución espacial mayor que la del «Estudio de la movilidad con Big Data (MITMA)»: en el primer caso, 3.214 «áreas INE» con unos valores medios de 15.000 personas y 270 km^2 (valores extremos: 201 y 460 km^2); en el segundo, 2.205 «municipios» con un promedio de 21.400 personas y 229 km^2 (0,75 km^2 de superficie mínima y 2.623 km^2 de superficie máxima) y 2.805 distritos cuya superficie media es de 177 km^2 (valores extremos: 0,13 y 2.623 km2). Los datos del primer estudio son útiles para delimitar Áreas Urbana Funcionales a partir de los flujos de movilidad cotidiana internos y externos en estas áreas (Instituto Nacional de Estadística, 2020, p. 5). El estudio del MITMA contiene datos sobre la distribución horaria de los viajes y en segmentos de distancia para cada una de las unidades espaciales, lo que hace posible el análisis de patrones espaciales de tiempo y distancia de la movilidad.

3. FLUJO DE TRABAJO PARA ORGANIZAR INFORMACIÓN ORIGEN-ORIGEN DESTINO DE LA MOVILIDAD DESDE LOS ARCHIVOS DEL «ESTUDIO DE LA MOVILIDAD CON BIG DATA» (MITMA) CON EL PROGRAMA *ORANGE*

La información producida por los estudios citados (y por otros similares) se publica en grandes archivos independientes con datos de algún período de tiempo o bien organizada en bases de datos. En cualquier caso, la mayoría de los proyectos de investigación solo utiliza una parte de esta información por lo que, habitualmente, es necesario un trabajo de selección, estructuración y, si conviene, de visualización de los datos requeridos para desarrollar el proyecto.

Para estudiar la relación entre la estructura de la movilidad con determinadas características territoriales y sociodemográficas en Aragón, se ha utilizado la información de movilidad del estudio del MITMA correspondiente a la semana de referencia, extraída de los archivos origen-destino por zonas MITMA-municipio de cuatro días consecutivos (lunes a jueves, 17 a 20 de febrero de 2020) (maestra1) y de los archivos con el número de viajes de las personas en los mismos días (maestra2).

La selección y organización de los datos para su posterior análisis estadístico y espacial se ha llevado a cabo con el programa *Orange*. Esta aplicación posee una gran capacidad para seleccionar, transformar, modelar, analizar y visualizar información de grandes archivos de datos de forma interactiva. La interfaz es muy intuitiva y requiere muy poco tiempo de aprendizaje: consiste en una colección de unidades funcionales elementales *(widgets),* representadas por iconos y agrupadas por tipos de función, que el usurario conecta entre sí para formar un proceso que desarrolla un trabajo complejo. El diagrama así compuesto se puede anotar y guardar para repetir la tarea con los mismos datos o con otros. Para mejorar la claridad de esta exposición presentamos varios diagramas de flujo, aunque las funciones que se utilizan para buscar y transformar los datos se pueden organizar en un solo flujo de trabajo; en todo caso, utilizar uno o varios diagramas depende de diversos factores, propios de cada proyecto.

Tabla 1. Características generales de los datos de movilidad «INE» y «MITMA»

CARACTERÍSTICAS	*Estudios de movilidad a partir de la telefonía móvil (INE)*	*Estudio de la movilidad con Big Data (MITMA)*
Ámbito poblacional	Todos los teléfonos móviles de los residentes en España -> población residente en España	Población residente en España.
Ámbito espacial	Territorio nacional	Territorio nacional
Ámbito temporal	Estudio EM-1: 18-21 de noviembre de 2019. Estudio EM-2: 16 de marzo a 20 de junio de 2020. Estudio EM-3: junio-diciembre de 2020; Estudio EM-4: enero-noviembre de 2021. Movilidad cotidiana: datos los miércoles y domingos desde marzo de 2021; movilidad estacional: cuatro días de 2020 (18 de julio, 15 de agosto, 22 de noviembre y 25 de diciembre)	Movilidad diaria por zonas MITMA, distritos y municipios (de los tres días anteriores a su publicación): semana tipo (14 al 20 de febrero de 2020); desde el febrero de 2020 hasta mayo de 2021
Muestra	Terminales de los tres operadores de telefonía móvil principales (78,7% de los teléfonos móviles)	Más de 13 millones de líneas móviles
Unidades espaciales	Áreas de movilidad INE (3.214)	Zonas MITMA (2.205 municipios; 2.805 distritos)
Contenidos	Matriz de movilidad cotidiana origen-destino: Matriz de población de día y de noche. Matriz de población estacional	Maestra 1: matrices origen-destino de la movilidad por distritos y municipios segmentada según distancia ortodrómica entre origen y destino (6 intervalos de distancia) y en tramos de 1 hora. Maestra 2: distribución de los viajes por persona (1, 2 y más de dos viajes).
Archivos	Datos temáticos: tablas en formato Excel.xlsx; Datos espaciales: áreas de movilidad en archivos shp	Datos temáticos: archivos diarios, o por meses completos, en formato csv (separador de campos: |); datos espaciales: zonificación de municipios y distritos en archivos shp
Visualización	Visor de mapas por comunidades y ciudades autónomas, provincias y áreas de movilidad. Gráficos de barras que representan variables por fecha. Visor de mapas con resultados por áreas de movilidad (origen-destino, variaciones, etc.).	Gráficos interactivos de la movilidad diaria por hora y distancia y de la movilidad de las personas a escala nacional, autonómica, provincial y local

Fuente: INE (2020, 2021) y MITMA (2021). Elaboración propia

3.1. Selección de datos origen-destino correspondientes a los «municipios» de Aragón

Cada uno de los archivos originales de los cuatro días utilizados contiene algo más de millón y medio de registros con las variables y estructura que se representa a continuación (primer registro del 17 de febrero de 2020):

fecha|origen|destino|periodo|distancia|viajes|viajes_km
20200217|01001_AM|01001_AM|00|002-005|8.936|34.640

El trabajo realizado en esta fase ha consistido en seleccionar los registros con los desplazamientos desde cualquier origen a uno de las 82 «zonas MITMA-nivel municipios» de Aragón y de estos a cualquier destino y anexar *(append)* los archivos de los cuatro días en uno solo. El archivo resultante tiene la misma estructura que los originales y 154.316 registros (se han seleccionado unos 37.000 registros de cada uno de

los días). La secuencia de funciones utilizadas para la selección de los desplazamientos origen-destino se representa en la Figura 1.

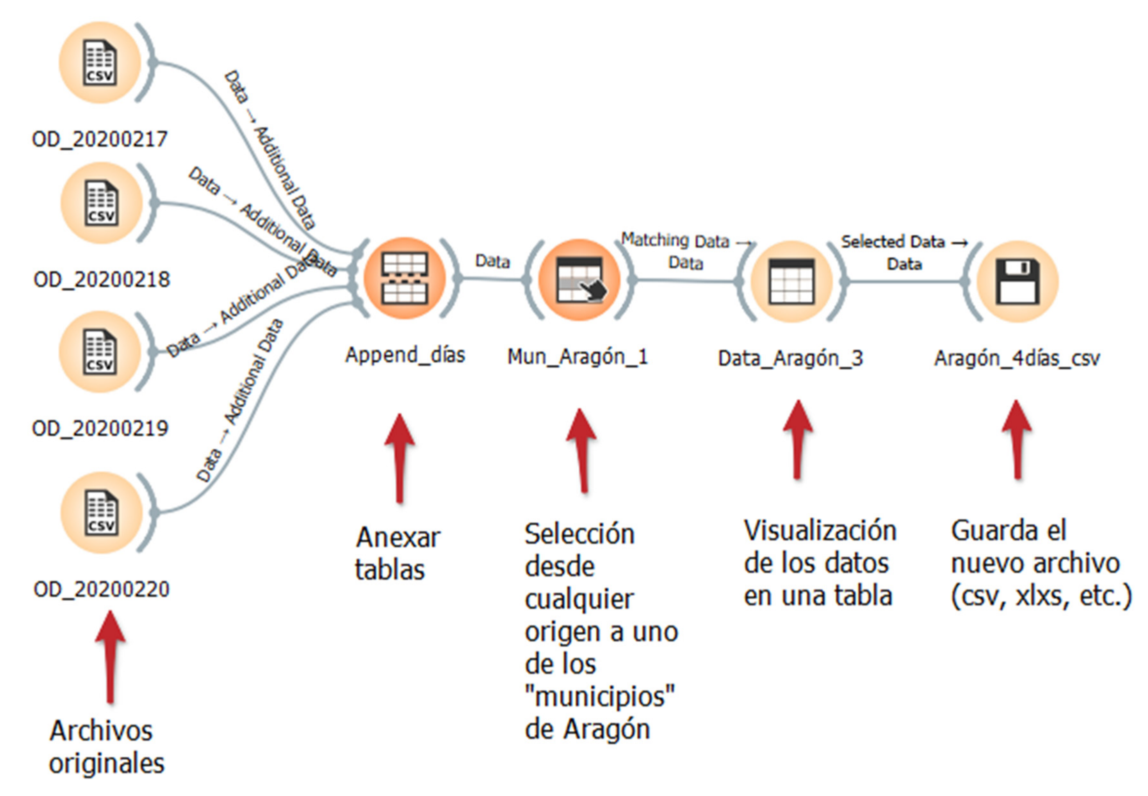


Figura 1. Diagrama de flujo de la selección de datos origen-destino correspondientes a las 82 «zonas MITMA-nivel municipios» de Aragón.

3.2. Transformación de datos para derivar nueva información

El archivo con los flujos de movilidad origen-destino de las «zonas MITMA-nivel municipios» aragoneses durante los cuatro días de la *semana de referencia de movilidad*, se ha utilizado para obtener nuevos datos resultantes del cruce de variables. A título de ejemplo, se presentan en el diagrama de la Figura 2 las funciones para elaborar las tablas siguientes: la suma de viajes y viajes-km por cada conexión origen-destino (en total, 14.529 registros), la distribución de la suma de viajes y viajes-km según intervalos de distancia desde el origen (480 registros) la suma de viajes y viajes-km desde el origen según su distribución horaria (1.968 registros); finalmente, la distribución del número de viajes y viajes-km se ha representado también en un gráfico de barras.

En la Figura 3 se reproducen el encabezamiento y los primeros registros de algunas tablas creadas con las funciones representadas el diagrama de la Figura 2.

Los archivos con la información de los viajes por persona (0, 1, 2 3 y más) se han procesado de forma similar para obtener la distribución del número de viajes en cada uno de las «zonas MITMA -nivel municipios» de Aragón.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Las nuevas tecnologías de la información han puesto a disposición de los investigadores datos de movilidad que contienen la localización de actividades de movilidad y de trayectorias espaciales de los movimientos, así como otra información temática. Los datos georreferenciados posibilitan el estudio de los patrones espaciales y temporales de la movilidad y su relación con las características del territorio (físicas, sociales, demográficas, económicas, dotación de infraestructuras, etc.). Para valorar la contribución de estos datos al conocimiento de la movilidad, es necesario elaborar trabajos basados en la información extraída de archivos masivos de datos mediante nuevos métodos y programas diseñados para el procesamiento de estos archivos.

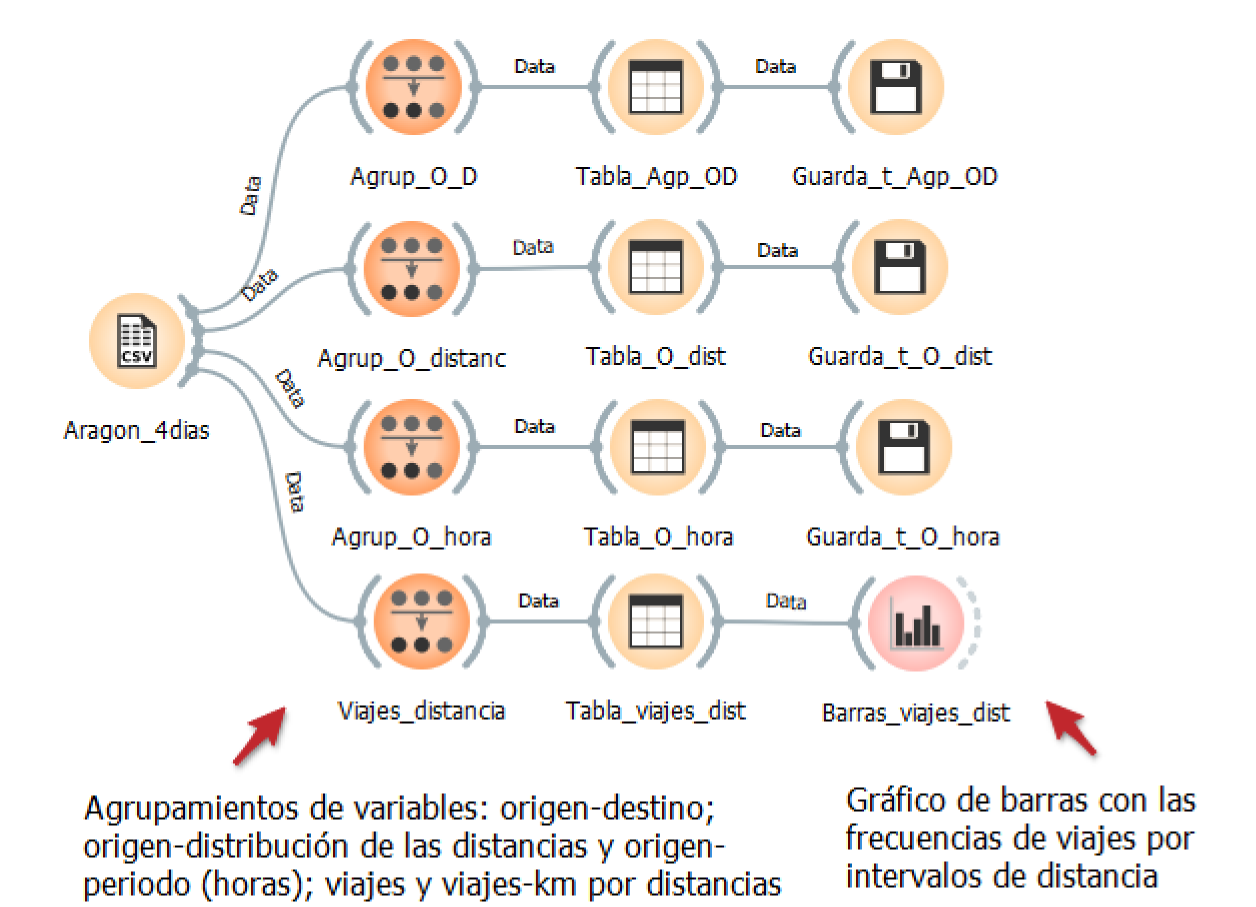
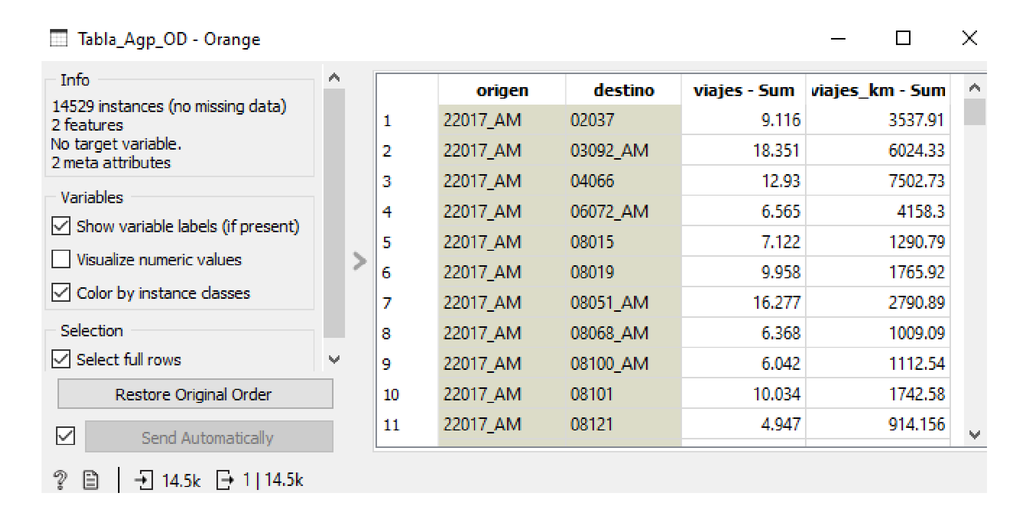


Figura 2. Diagrama de flujo para derivar nueva información.



	origen	destino	viajes - Sum	viajes_km - Sum
1	22017_AM	02037	9.116	3537.91
2	22017_AM	03092_AM	18.351	6024.33
3	22017_AM	04066	12.93	7502.73
4	22017_AM	06072_AM	6.565	4158.3
5	22017_AM	08015	7.122	1290.79
6	22017_AM	08019	9.958	1765.92
7	22017_AM	08051_AM	16.277	2790.89
8	22017_AM	08068_AM	6.368	1009.09
9	22017_AM	08100_AM	6.042	1112.54
10	22017_AM	08101	10.034	1742.58
11	22017_AM	08121	4.947	914.156

Figura 3. De arriba abajo: viajes y viajes-km según origen-destino; viajes y viajes-km según su distancia desde el origen; viajes y viajes-km desde origen según su distribución horaria; viajes y viajes-km según intervalos de distancia (desde 500 m hasta más de 100 km).

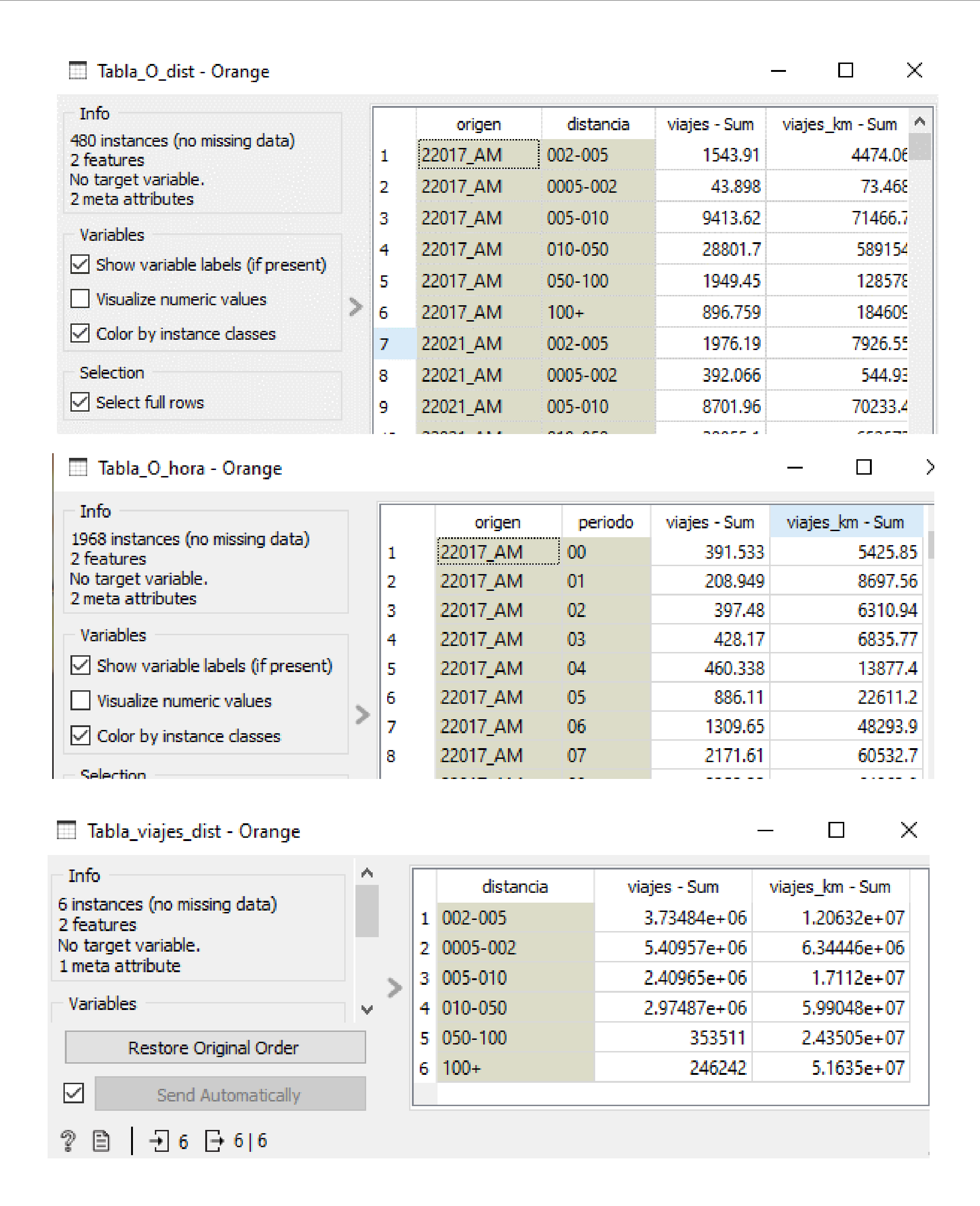


Figura 3. (cont.)

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contiene resultados del proyecto PID2020-115904RB-I00 financiado por el programa MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

5. BIBLIOGRAFÍA

Bisanzio, D., Kraemer, M. U. G., Bogoch, I. I., Brewer, T., Brownstein, J. S. y Reithinger, R. (2020). Use of Twitter social media activity as a proxy for human mobility to predict the spatiotemporal spread of COVID-19 at global scale. *Geospatial Health*, 15(1). https://doi.org/10.4081/gh.2020.882

Demsar, J., Curk, T., Erjavez, A., Group, C., Hocevar, T., Milutinovic, M., Mocina; M., Polajnar, M., Toplak, M., Staric, A., Stajdohar, M., Umek, L., Zagar, L., Zbontar, J., Zitnik, M. y Zupan, B. (2013). Orange: Data Mining Toolbox in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 14(Ag.), 2349–2353. http://jmlr.org/papers/v14/demsar13a.html

Instituto Nacional de Estadística. (n.d.). *Estudios de movilidad a partir de la telefonía móvil*. Recuperado de (mayo, 2022) https://www.ine.es/experimental/movilidad/experimental_em.htm

Instituto Nacional de Estadística. (2020). *Estudio EM-1 de movilidad a partir de la telefonía móvil. Proyecto técnico* (p. 13). INE. https://ine.es/experimental/movilidad/experimental_em1.htm

Instituto Nacional de Estadística. (2021). *Estudios de movilidad a partir de la telefonía 2020-2021. Proyecto técnico*. https://www.ine.es/experimental/movilidad/exp_em_proyecto.pdf

Liu, Z. C., Yu, J. B., Xiong, W. T., Lu, J., Yang, J. Y., Wang, Q. y IEEE. (2016). Using Mobile Phone Data to Explore Spatial Temporal Evolution of Home-Based Daily Mobility Patterns in Shanghai. In *2016 International Conference on Behavioral, Economic and socio-cultural Computing (BESC)* (Issue IEEE/ACM International Conference on Behavioral, Economic, Socio-Cultural Computing (BESC), pp. 66–71).

Ministerio de Fomento (2019). *Estudio de la Movilidad Interprovincial de Viajeros aplicando la Tecnología Big Data -Proyecto piloto- Informe metodológico*. https://cdn.fomento.gob.es/portal-web-drupal/Docs_OTLE/MFOM-Estudio_Movilidad_Interprovincial_Informe_Metodologico.pdf

Ministerio de Transportes, M. y A. U. (n.d.). *Movilia 2006/2007*. Recuperado de (mayo, 2022) https://www.mitma.gob.es/informacion-para-el-ciudadano/informacion-estadistica/movilidad/movilia-20062007/encuesta-de-movilidad-de-las-personas-residentes-en-españa-movilia-20062007

Ministerio de Transportes, M. y A. U. (2021). *Análisis de la movilidad en España con tecnología Big Data durante el estado de alarma para la gestión de la crisis del COVID-19. Informe metodológico*. https://www.mitma.gob.es/ministerio/covid-19/evolucion-movilidad-big-data

Ministerio de Transportes, M. y A. U. (MITMA). (n.d.). *Estudio de movilidad con Big Data*. Recuperado de (mayo 2022) https://www.mitma.gob.es/ministerio/covid-19/evolucion-movilidad-big-data

Moya-Gómez, B., Stępniak, M., García-Palomares, J. C., Frías-Martínez, E. y Gutiérrez, J. (2021). Exploring night and day socio-spatial segregation based on mobile phone data: The case of Medellin (Colombia). *Computers, Environment and Urban Systems*, 89, 101675. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101675

Osorio-Arjona, J. y García-Palomares, J. C. (2017). Nuevas fuentes y retos para el estudio de la movilidad urbana. *Cuadernos Geográficos*, 56(3), 247–267. https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/5352/5858

Pászto, V., Burian, J. y Macků, K. (2021). Changing Mobility Lifestyle: A Case Study on the Impact of COVID-19 Using Personal Google Locations Data. *International Journal of E-Planning Research*, 10(2), 66–79. https://doi.org/10.4018/IJEPR.20210401.oa6

Romanillos, G., García-Palomares, J. C., Moya-Gómez, B., Gutiérrez, J., Torres, J., López, M., Cantú-Ros, O. G. y Herranz, R. (2021). The city turned off: Urban dynamics during the COVID-19 pandemic based on mobile phone data. *Applied Geography*, 134. https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2021.102524

Sadowski, A., Galar, Z., Walasek, R., Zimon, G. y Engelseth, P. (2021). Big data insight on global mobility during the Covid-19 pandemic lockdown. *Journal of Big Data*, 8(1), 78. https://doi.org/10.1186/s40537-021-00474-2

Sheller, M. y Urry, J. (2006). The New Mobilities Paradigm. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 38(2), 207–226. https://doi.org/10.1068/a37268

Urry, J. (2012). *Mobilities* (reprint). Polity Press.

Vannoni, M., McKee, M., Semenza, J. C., Bonell, C. y Stuckler, D. (2020). Using volunteered geographic information to assess mobility in the early phases of the COVID-19 pandemic: a cross-city time series analysis of 41 cities in 22 countries from March 2nd to 26th 2020. *Globalization and Health*, 16(1). https://doi.org/10.1186/s12992-020-00598-9

Wang, H. y Yamamoto, N. (2020). Using a partial differential equation with Google Mobility data to predict COVID-19 in Arizona. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 17(5), 4891–4904. https://doi.org/10.3934/mbe.2020266

Xiong, C., Hu, S., Yang, M., Luo, W. y Zhang, L. (2020). Mobile device data reveal the dynamics in a positive relationship between human mobility and COVID-19 infections. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(44), 27087–27089. https://doi.org/10.1073/pnas.2010836117



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 592-599

Visores web GIS 3D para la integración con BIM en proyectos de infraestructura lineal de transportes

L. Martín Forero[1]

[1] *Gerencia de Área BIM, Ineco. Avenida Partenón 4-6, 28042 Madrid*

laura.martin@ineco.com

RESUMEN: Los visores web GIS en 3D se han convertido en el mejor medio de difusión y colaboración en el ámbito de la integración BIM y GIS de la ingeniería de transportes. El diseño de infraestructuras lineales necesita de escenarios virtuales tridimensionales basados en el mundo real como soporte para que ambas disciplinas integren toda la información necesaria de cada proyecto sin limitaciones de escala o extensión. Estos visores son multidispositivo y tienen un acceso muy simple a través de cualquier explorador web, liberando así al usuario de tener conocimientos o capacitación de uso de softwares técnicos muy específicos. Sirven como herramienta de trabajo para los técnicos, para mejorar la toma de decisiones a los administradores de las infraestructuras, y facilita el acceso a cualquier interesado cuando el proyecto alcanza la fase de información pública.
Además, son útiles para conocer de ante mano el territorio idóneo dónde ubicar una nueva infraestructura y minimizar así los impactos o conflictos en fases posteriores. Son adecuados para evitar la pérdida de información y el uso de datos cruzados, permitiendo la visualización de las soluciones o alternativas propuestas haciendo partícipes a un mayor número de agentes involucrados. Así, esta *preconstrucción* virtual ha supuesto la evolución desde los planos hacia un entorno colaborativo y digital, donde se centraliza toda la información de los proyectos y contribuye, además, a optimizar la coordinación entre las disciplinas que intervienen, al disponer de un entorno común de información en el que conviven todas ellas.
BIM y GIS comparten muchas características, la principal es que ambas manejan entidades geométricas 3D georreferenciadas con información alfanumérica asociada. Entonces, la forma simple de entender la integración entre BIM y GIS es imaginar un gran puzle virtual donde cada pieza es un modelo BIM que debe colocarse en su ubicación exacta. Después de un cuidado trabajo colaborativo entre especialistas, modelo a modelo se construye el escenario o maqueta virtual donde todas las diciplinas implicadas aportan sus datos y modelos centralizado todo en un mismo lugar. Se superan así las barreras existentes en cuanto al intercambio de información procedentes de diferente software gracias al empleo de formatos interoperables.
La integración BIM y GIS democratiza el acceso a la información de los proyectos, y sobre todo facilita el consenso social gracias al aumento de la confianza derivada de una mejor comprensión de la información.

Palabras-clave: 3D, BIM, visor web, ingeniería, transporte, i3S, SLPK, IFC, GIS, gemelo digital.

1. INTRODUCCIÓN

La metodología ***building información modelling*** (BIM) ya es una realidad desde hace años en el sector de la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC). Se le considera una nueva metodología de trabajo colaborativo que llegó para revolucionar el mundo del diseño al optar por el modelado 3D y la incorporación de información asociada a las entidades como base sustancial. *"Building Information Modeling* (BIM) es una metodología de trabajo colaborativa para la creación y gestión de un proyecto de construcción. Su objetivo es centralizar toda la información del proyecto en un modelo de información digital creado por todos sus agentes.*",* descripción disponible en Building Smart (https://www.buildingsmart.es/bim/). Desde su proliferación en Europa sobre todo desde el año 2010 con la implantación BIM en Reino Unido, muchos técnicos GIS hemos visto numerosas similitudes que nos hacía fácil entender los métodos y los objetivos, comprobado que aparecían sinergias muy útiles entre BIM y GIS debido a un profundo proceso de digitalización y de gestión sobre bases de datos.

En la práctica son tres elementos clave los que han posibilitado que entre ambos mundos exista un

lenguaje común: geometría referida al mundo real con coordenadas absolutas; datos alfanuméricos asociados a los objetos geométricos tridimensionales, e Identificadores *(GUID)* únicos para cada una de las entidades. En definitiva, que BIM permite producir y almacenar toda la información necesaria para operar en las distintas fases del ciclo de vida de un proyecto de diseño de infraestructuras. Por otro lado, en los últimos años hemos asistido a un periodo de gran expansión GIS motivado por el increíble avance de la tecnología, el software y la aparición de nuevos métodos de adquisición de datos. La proliferación de nuevas fuentes y de recursos de datos geoespaciales 3D así como el incremento en agilidad y rendimiento en procesado y almacenamiento, han supuesto una nueva revolución digital geoespacial encaminada a conseguir gemelos digitales (Lee y Lee 2021).

Sin embargo, es la llegada de internet web 2.0 la que modificó para siempre la forma de usar y consumir GIS llegando a hacerlo tan extensivo como cotidiano y no sólo en el ámbito profesional. La llegada de Google Earth en 2005 además de servir servicios de cartografía ya permitió desarrollar nuevas aplicaciones gracias a una interfaz libre de programación, haciendo que proliferaran aplicaciones en disciplinas y campos muy diferentes a los que se habían dado hasta ese momento. Pero estos avances requerían de grandes esfuerzos en programación y eran necesarios otros conocimientos específicos en desarrollo web de los que la mayoría de los técnicos carecíamos y, aunque parecieran novedosos y apetecibles, eran inviables sobre todo en proyectos de menor envergadura o con plazos más ajustados. De hecho, era un factor muy limitante en la gestión de recursos técnicos y humanos en el desarrollo de aplicaciones web GIS.

Pero es la incorporación de GIS en la nube y que proveedores comerciales de software pongan a disposición de los técnicos herramientas web sencillas, lo que ha revolucionado la forma de trabajar con GIS. Un creciente número de usuarios, sin ser expertos en programación ni desarrollo web, son capaces ahora de publicar sus propias aplicaciones web GIS y compartirlas con cualquier interesado desde cualquier lugar tan sólo con acceso a internet.

2. METODOLOGÍA

2.1. Un proyecto de proyectos

Este trabajo recoge parte de la experiencia y algunas conclusiones alcanzadas en el campo de la integración BIM-GIS como resultado de los trabajos fruto de la colaboración entre Ingenieria y Economía del transporte S.M.E.M.P.S.A (Ineco) y Ferrocarriles de Gran Canaria (FGCSA). FGCSA es una empresa pública cuyo objeto es asegurar la implantación del transporte colectivo ferroviario en la isla de Gran Canaria, y cuyo objetivo principal es dotar a la isla de un sistema ferroviario capaz de ofrecer un servicio rápido, confortable, fiable, seguro, eficiente, intermodal y sostenible.

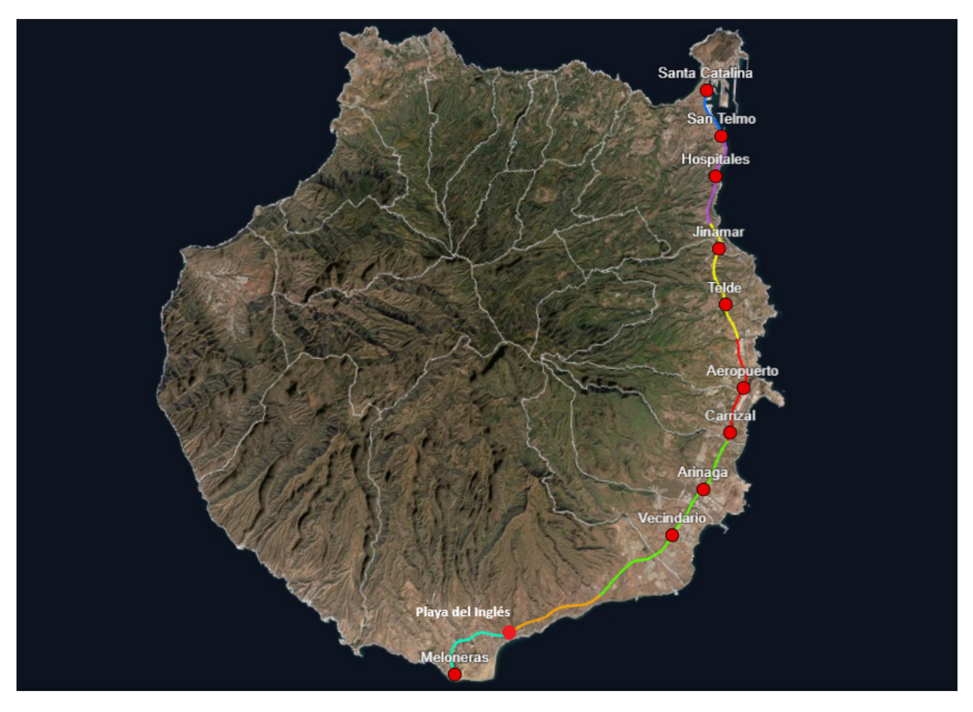


Figura 1. Localización de futuras estaciones y tramos del proyecto. Visor web del proyecto. Elaboración propia.

El encargo esencial de FGCSA a Ineco fue implantar la metodología BIM sobre proyectos constructivos ya realizados en su totalidad de forma convencional. Esta digitalización ha supuesto un hito importante para las fases posteriores porque permite gestionar todo el ciclo de vida de la infraestructura (construcción, explotación y mantenimiento), la operación del material móvil, mantenimiento en talleres y cocheras, y la alimentación eléctrica con el parque eólico. Este proyecto de proyectos se localiza a modo de corredor en el área oriental de la isla de Gran Canaria cuyo inicio será la futura estación de Santa Catalina en Las Palmas de Gran Canaria y finalizará en la estación de Meloneras en el límite sur, en la zona turística de Máspalomas. Esta gran línea ferroviaria vertebrará todo un sistema de transporte integrado que persigue aumentar la velocidad de los desplazamientos, reducir el consumo de energía y conectar industria, turismo y ciudades en su recorrido. La figura 1 muestra esquemáticamente la composición de la línea.

Con una longitud de 57, 8 km total, consta de 7 tramos de plataforma de vía y 11 estaciones además de otros edificios mencionados anteriormente: talleres, cocheras, instalaciones auxiliares, y un parque eólico para autoconsumo de la línea. Las figuras 2 y 3 muestran algunos ejemplos.



Figura 2. Infografía de la estación de Telde del proyecto constructivo. Ineco

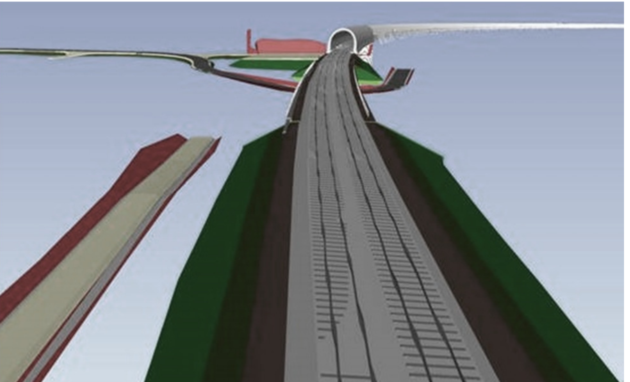


Figura 3. Modelo BIM del tramo 3 con el túnel de Telde al fondo. Imagen extraída del software Istram. Elaboración propia.

Con la metodología BIM se ha conseguido integrar toda la información de los diversos tramos, reducir el espacio de almacenamiento, mejorar su conservación, estructurar y ordenar los datos permitiendo su acceso en cada momento. La información ha quedado centralizada para permitir su uso agregado y ello ha permitido optimizar los procesos en fases posteriores.

Sin embargo, para que esta digitalización de proyectos fuera efectiva y completa, se necesitaba un entorno GIS capaz de visualizar y consultar todos los proyectos de forma simultánea y donde, debido a la envergadura, el contexto territorial se considerara imprescindible para hacer comprobaciones y tomar decisiones acertadas.

El resultado ha sido un proyecto auditado y validado con todas las disciplinas interpuestas que se puede consultar en 3D y que se irá actualizando a tiempo real en sincronía con la ejecución de la obra porque, además, será posible controlar todas las incidencias en la fase de mayor inversión como es la obra, periodo donde las administraciones deben ser eficientes a la hora de gestionar sus recursos.

2.2. Archivos interoperables utilizados

La integración de BIM y GIS seguiría siendo muy compleja si las grandes empresas de software no hubieran apostado por la adopción y utilización de estándares. Sin lugar a duda este es el hecho quizás de mayor relevancia y de trascendencia en los últimos años, incrementando notablemente la interoperabilidad entre ambos mundos y la reducción en los tiempos de procesado. En el caso que nos ocupa se optó por la solución ArcGIS PRO de la empresa *Environmental Systems Research Institute* (Esri) como herramienta fundamental a la hora de hacer realidad esta integración. Desde la versión 2.8 de junio de 2021 ya permite la lectura directa de los archivos *Industry Foundation Classes* (IFC) procedentes de BIM sin necesidad de utilizar otras soluciones de software intermedias de extracción, transformación y carga (ETL) requeridas hasta entonces para transformar los parámetros específicos BIM en atributos GIS.

2.2.1 Archivos IFC

Estos archivos de escritura siguen el estándar creado por Building Smart Internacional

(https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/) cuyo objetivo es ser la mejor vía para el intercambio de modelos BIM. Sigue uno de los más importantes fundamentos de la metodología en cuanto a liberar la información de repositorios poco accesibles para que la cooperación y la colaboración en los proyectos sea una realidad. Al ser un formato independiente del software nativo comercial, pretende en su esencia, la transferencia sin distorsión y pérdida de información para ser usados por las diferentes disciplinas que intervienen en un proyecto, desde la arquitectura en edificios hasta la geotecnia como se puede apreciar en el ejemplo de la figura 4.

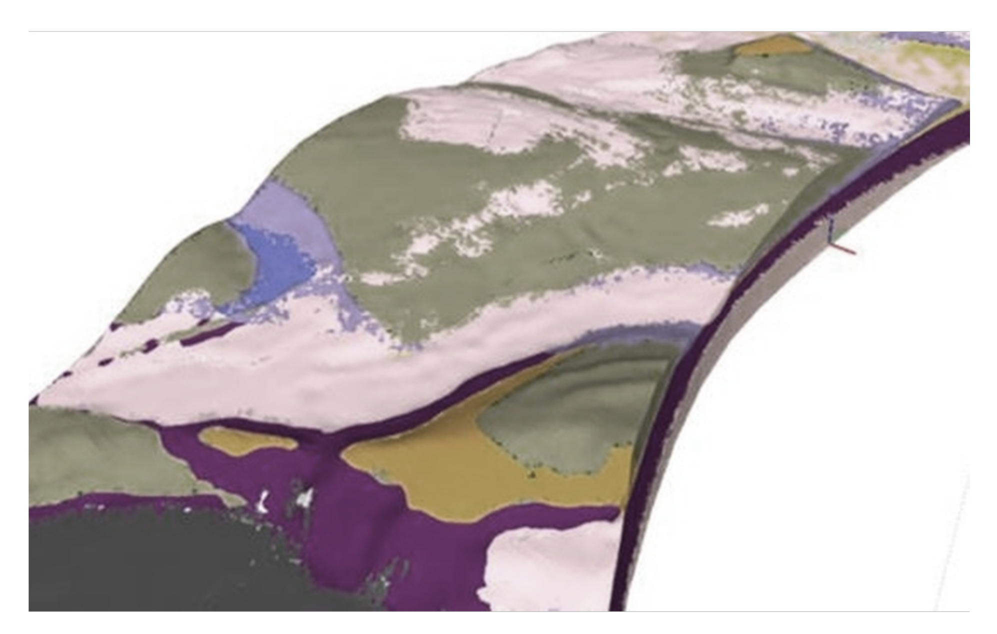


Figura 4. Modelo de geotecnia del tramo 3. Imagen extraída del software Leapfrog. Elaboración propia.

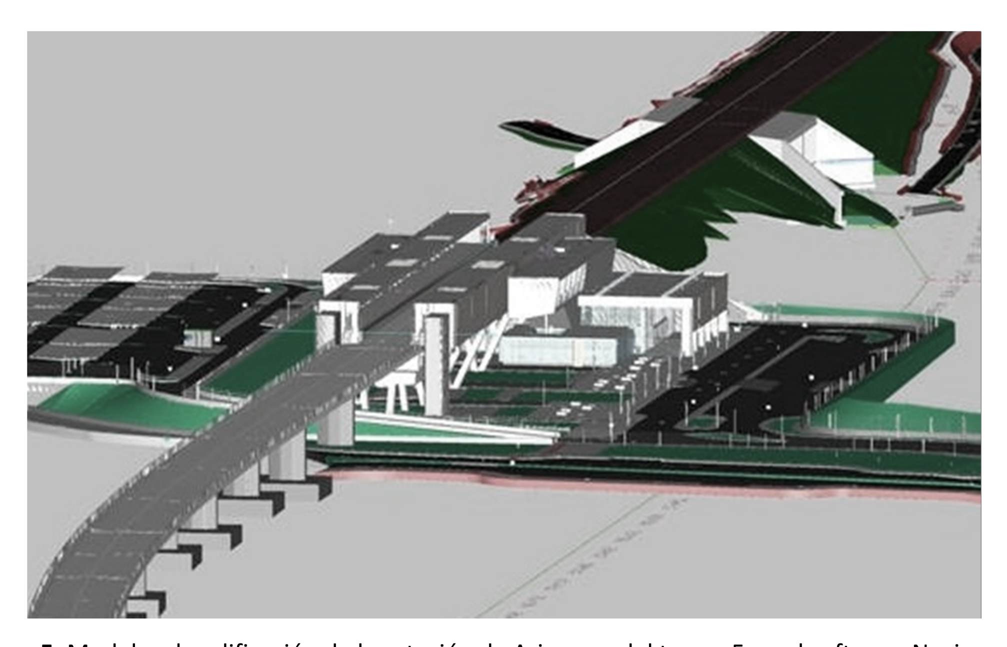


Figura 5. Modelos de edificación de la estación de Arinaga y del tramo 5 en el software Navisworks. Elaboración propia

En el proceso de digitalización y modelado de los proyectos se utilizaron diversas aplicaciones comerciales: Revit de la empresa Autodesk para los modelos BIM de edificación y estructuras, Istram de Buhodra Ingeniería S.A., para los modelos de ingeniería civil y Leapfrog de empresa Seequent para los modelos de geotecnia y sondeos. Esta variedad hacía incompatible trabajar con modelos nativos, por lo que la integración de todos los archivos exigía un lenguaje común BIM que permitiera usar la estandarización como medio de

unificación. La elección de IFC ha sido un acierto no sólo en la parte BIM sino también, como vía de comunicación y transferencia eficiente hacia el mundo GIS. ArcGIS Pro es capaz de leer las coordenadas geográficas contenidas en los modelos IFC y además es capaz de escalar correctamente la geometría según las unidades especificadas. En las figuras 5 y 6 se puede ver la diferencia en la visualización de los modelos en un visor BIM a un visor GIS.

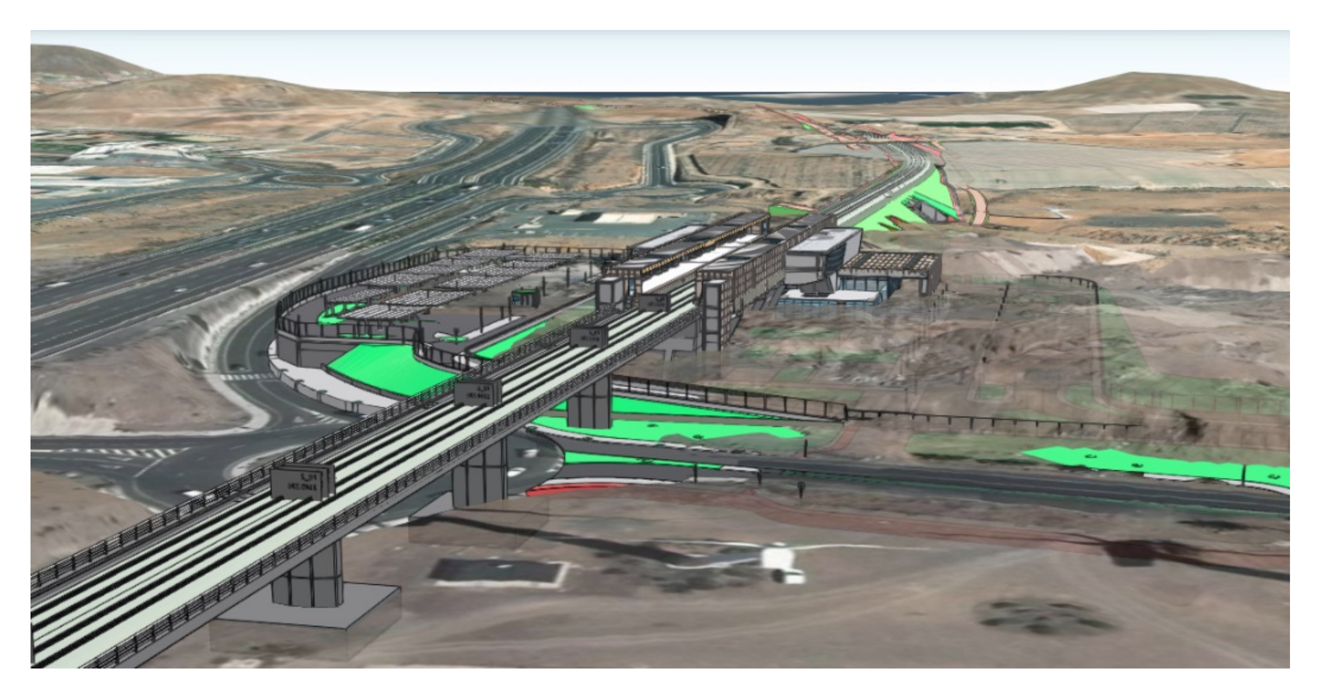


Figura 6. Modelos de edificación de la estación de Arinaga y del tramo 5 en el software ArcGIS PRO. Elaboración propia

2.2.2 Archivos de paquete de escenas, Scene Layer Package (SLPK)

Como se ha mencionado anteriormente, en los últimos años se ha incrementado la disponibilidad y demanda de información geográfica en 3D (Ojeda, 2010). Esto unido a que los escenarios tridimensionales son cada vez más realistas y precisos, nos da la posibilidad de trabajar más cómodos realizando análisis espaciales donde la coordenada z se tenga en cuenta.

La empresa Esri hace unos años estandarizó un servicio web abierto llamado Indexeed 3D Scene Layer (i3S) que además incluye la especificación del paquete de capa de escena SLPK (https://github.com/Esri/i3s-spec) un tipo de archivo que engloba toda la información contenida en una escena o escenario que es ligero, fácil de transferir, consumir, y con la ventaja añadida de estar optimizado para la web con los estándares REST y JSON.

Además, como característica singular los archivos SLPK destacan porque permiten el cacheado e indexado cuando se convierte a servicio web, es decir, que deja ver el contenido a distintos niveles de detalle en función de la extensión, o nivel de zoom que se esté utilizando en pantalla. Esto es algo fundamental a la hora de poder visualizar gran cantidad de modelos 3D ya que mejora notablemente el rendimiento y la fluidez del resultado aun manejando modelos complejos.

A igual que IFC la especificación i3S y SLPK son formatos abiertos, en este caso aprobados por el Consorcio Geoespacial Abierto (OGC) que pueden ser consumidos en clientes ligeros web, escritorio y dispositivos móviles (https://www.ogc.org/standards/i3s).

2.3 Flujo de trabajo

Una vez finalizado el proceso de digitalización mediante modelado BIM, los archivos IFC resultantes se llevaron a ArcGIS PRO. Allí como paso de partida, se comprobó que no había habido pérdida de elementos geométricos ni tampoco de parámetros tanto generales como específicos y que por tanto eran propicios para la siguiente fase.

En segundo lugar, los modelos se georreferenciaban correctamente. En el caso en que se verificara

que las coordenadas estaban bien fijadas, se procedía a crear el archivo con de extensión PRJ con la georreferenciación oportuna. En cambio, si las coordenadas no eran las esperadas bien se enviaba de vuelta al modelado BIM para su corrección, o bien en el caso de que no hubiera una referencia clara, se georreferenciaban en GIS en base a planos CAD de los proyectos convencionales.

El tercer paso, el más importante porque es el paso de IFC a SLPK en ArcGIS PRO, se produjo un símil o réplica de los modelos BIM en GIS. Después ya era posible publicarlos en la plataforma web ArcGIS On Line para poder consumidos como servicios web 3D.

Una vez configurados los requerimientos de privacidad en la plataforma web para cada archivo, se incorporaron en una escena 3D web. Ya era posible acceder a todos los archivos procedentes de BIM en una *url* web. Para maquetar y añadir algunas otras funcionalidades GIS como medir distancias, activar y desactivar capas, o marcadores que ayudan a la localización de elementos (figura 7) se usó Web App Builder de Esri. Este web GIS permite crear de forma intuitiva visores web GIS 3D muy potentes y funcionales sin necesidad de programación.



Figura 7. Detalle del tramo 5 con la información geográfica sobre riesgo de inundación del MITECO. Visor web del proyecto. Elaboración propia.

3 RESULTADOS DE LA INTEGRACIÓN EN EL VISOR

3.2 Modelado

El resultado ha sido la obtención de un modelo integrado de una infraestructura completa, pionero en España. Más de doscientos modelos adecuados para su uso en GIS con el detalle de proyecto en fase constructivo que se pueden consultar de forma simultánea. En la tabla 1se muestra el resumen.

4 DISCUSIÓN

Si bien este trabajo ha sido realizado con software comercial, y en un futuro próximo debería haber intentos similares con software y plataformas web libres, hay que recalcar la importancia de llevar a cabo la integración de un proyecto de esta envergadura. Un proyecto de infraestructura lineal ferroviario complejo y extenso que ha servido para, además de alcanzar un objetivo ambicioso, comprobar el rendimiento de los modelos en la plataforma web hasta unos máximos de los que no existen referencias anteriores en proyectos de ingeniería reales en España.

Aunque se ha reducido el peso de los archivos en un 37% en GIS con respecto a los modelos IFC, aún queda por resolver aspectos en cuanto a la agilidad en la visualización para dar una mejor experiencia al usuario. Al activar y desactivar elementos, dependiendo del volumen y complejidad, puede resultar lenta la carga. A pesar de ello, supera con creces las capacidades de la mayoría de los visores BIM a la hora de cargar modelos a la vez.

Tabla 1. Resumen cuantitativo de modelos BIM transferidos a GIS.

Modelos BIM	*Total*	*Tamaño de letra*
Tramos	115	**6** modelos de Trazado **6** modelos de Plataforma **6** modelos de Movimiento de Tierras **6** modelos de Drenaje **6** modelos de Instalaciones Ferroviarias **4** modelos de Instalaciones de túneles **81** modelos de Estructuras y Túneles **6** modelos geotécnicos
Subestaciones y líneas de avance	19	**9** modelos de subestaciones **2** modelos de Líneas de Acometida **4** modelos de Anillos **4** modelos de Centros de Transformación
Estaciones	44	**11** modelos de Arquitectura **11** modelos de Instalaciones **11** modelos de Estructura **11** modelos de Urbanización
Talleres y Cocheras	15	**5** modelos de Arquitectura **5** modelos de Estructura **5** modelos de Instalaciones
Línea Aérea de Contacto	6	**6** modelos BIM

5 CONCLUSIONES

Queda comprobado que para construir modelos sólidos del mundo real donde se combine la información y que los modelos BIM interactúen entre sí dentro del propio entorno virtual, los visores web GIS 3D son por el momento la mejor solución. Sobre todo, cuando se trata de infraestructuras lineales donde la extensión de territorio próximo es mucho mayor.

Se pueden utilizar para prever impactos o conflictos de la infraestructura con su entorno en otras fases iniciales o incluso conocer de ante mano el territorio idóneo donde ubicar una nueva infraestructura y minimizar así los impactos en fases posteriores.

Además, facilitan el acceso a todos los agentes interesados desde la misma fuente permitiendo decisiones sustentadas en conocimiento profundo de todas las variables que intervienen en el proyecto. Al liberar al usuario de tener una capacitación técnica para usar software complejo, facilita aún más el acceso y la comprensión de cualquier interesado. Y se ha constatado como una herramienta de trabajo valiosísima en el día a día, tanto de comunicación como de control de calidad.

6 BIBLIOGRAFÍA

Jackson, M. J. y Woodsford, P. (1991). GIS data capture hardware and software. *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, 1, 239-249.

Lee, D. y Lee, S. (2021). Digital twin for supply chain coordination in modular construction. *Applied Sciences*, 11(13), 5909. https://doi.org/10.3390/app11135909

Mengíbar, Y. T. y Jiménez, J. (2018). Servicios 3D con estándar i3S. *Mapping*, (192), 50-55 http://ojs.revistamapping.com/index.php?journal=MAPPING&page=article&op=view&path%5B%5D=130&path%5B%5D=20

Ojeda, J., Álvarez, J. I., Díaz, M. D. P., Prieto, A. y Cabrera, A. (2013). Instrumentos para el conocimiento, la difusión y gobernanza de las zonas litorales: visores 3D (desktop y web). Costa de Andalucía. *Geotemas,* 14, 31-34. https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/89890/3.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pedriza, A. y Citores, M. (2010, octubre 28) *Gestión Municipal a través de la Integración de los Estándares OGC en los Interfaces 3D*. I Jornadas ibéricas de Infraestructura de Datos Espaciales, Lisboa, Portugal. https://idee.es/resources/presentaciones/JIIDE10/ID426_Gestion_Municipal_a_traves_de_la_Integracion_de_los_Estandares_OGC_en_los_Interfaces_3D.pdf



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 600-606

Estrategia para el descubrimiento de información geográfica del territorio aragonés a través de IDEARAGON

R. Martínez Cebolla[1], D. Portolés Rodríguez[2], F. López Martin[1]

[1] *Instituto Geográfico de Aragón, Gobierno de Aragón. Pº María Agustín, 36. Edif. Pignatelli Puerta 14, 3ª Planta. 50.071 Zaragoza*
[2] *Idearium Consultores, SL. C. Alfonso I 17, 50.003 Zaragoza.*

rmartinezceb@aragon.es, dportoles@idearium.eu, flopezm@aragon.es

RESUMEN: La revolución de la información geoespacial está fundamentada por varios factores entre los que destacan el auge de las TIG y el empuje de los paradigmas Big, Open y Linked Data. El apellido geográfico se ha convertido en un elemento obligatorio para el descubrimiento de cualquier información. Cualquier persona física o jurídica, ya sea pública o privada, necesita conocer información de primera mano y de calidad para la toma de decisiones. Descubrir su existencia y, sobre todo la localización y la relación geográfica, se convierte en pieza indispensable de cualquier tipo de búsqueda. IDEARAGON ha desarrollado una estrategia común para aunar el conjunto de estándares preparados para la extracción, consulta, descarga y explotación de la información geográfica del territorio aragonés. La estrategia persigue un doble fin. Por un lado, el IGEAR requiere satisfacer las necesidades de los actores que usan el presente nodo autonómico. Y, por otro lado, la organización estima dar un paso más y relacionar el conocimiento geográfico de la región de manera que el usuario final se enriquezca de la búsqueda inicial realizada.

Palabras-clave: IDE, SDI, buscador, descubrimiento, Aragón

1. ESTADO DEL ARTE. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN

El descubrimiento de la información siempre se ha convertido en pilar fundamental en cualquier empresa que ha querido realizar el ser humano en el avance de la propia especie (Harari, 2011). En una infraestructura de datos espaciales, la búsqueda y hallazgo de información geográfica es clave en la construcción de un sistema que permita a cualquier actor usar la información para cualquier tipo de finalidad (Abad et al. 2012).

La revolución de la información geoespacial está fundamentada por varios factores entre los que destacan el auge de las TIG y el empuje de los paradigmas Big, Open y Linked Data. El apellido geográfico se ha convertido en un elemento obligatorio para el descubrimiento de cualquier información. Cualquier persona física o jurídica, ya sea pública o privada, necesita conocer información de primera mano y de calidad para la toma de decisiones. Descubrir su existencia y, sobre todo la localización y la relación geográfica, se convierte en pieza indispensable de cualquier tipo de búsqueda.

El descubrimiento de información geográfica es una necesidad que no cubren los sistemas de información geográfica o los sistemas de información territoriales, pero sí lo habilitan las infraestructuras de datos espaciales que articulan la interoperabilidad, el acceso y la explotación de gran cantidad de información que se debe complementar para realizar estudios territoriales de diversa índole ya sean urbanísticos, sectoriales o ambientales.

Con el fin de superar las limitaciones citadas, diversos autores realizan una evaluación de las siete iniciativas más usadas para la interoperabilidad entre sistemas (Young et al. 2003). En la interoperabilidad se identifican hasta cuatro niveles; el organizativo, el sintáctico, el semántico y el de máquina (Lewis et al. 2008). En ambos se redunda que muchos estándares se relacionan con uno de los niveles definidos, pero no son suficientes para lograr una interoperabilidad global en su sentido más amplio. Las propuestas de otros autores (Brock et al. 2003) buscan diseños de familias de estándares que permitan la creación de modelos que se integren automáticamente en ambientes de ejecución. De esta manera, los desarrolladores pueden proponer modelos dentro de su área particular y saber cómo adaptarse al ambiente compartido en el que deberán

interoperar.

Hay tesis enfocadas especialmente en la interoperabilidad entre datos espaciales (Zborovskiy, 2006) que trabaja lenguajes propuestos por Brock, pero reduciendo el dominio al de los datos espaciales exclusivamente, pero son propuestos con errores por comisión u omisión como el soporte al descubrimiento, la conexión automática a fuentes de datos espaciales o la ausencia de modelos matemáticos para el análisis de información.

Pese a la existencia de estándares geográficos, la interoperabilidad entre sistemas ya desarrollados es un problema, ya que la estructura de datos, procesos es propia de cada ecosistema de datos. La gran cantidad de datos dificulta su migración a estándares geográficos reconocidos y aceptados (McDonald et al. 2006).

Este artículo detalla la solución adoptada que permita comprender los elementos subyacentes a la interoperabilidad entre sistemas de información que necesitan consultar el apellido geográfico del fenómeno que consulta un determinado actor. El Instituto Geográfico de Aragón (IGEAR, en adelante) ha desarrollado una estrategia común a través de IDEARAGON para aunar el conjunto de estándares preparados para la extracción, consulta, descarga y explotación de la información geográfica del territorio aragonés. La estrategia persigue un doble fin. Por un lado, el IGEAR requiere satisfacer las necesidades de los actores que usan el presente nodo autonómico. Estas necesidades pasan por el descubrimiento per se de la información geográfica que es cuantiosa y variada en la base de datos de IDEARAGON que complica el conocimiento global de la información almacenada. Y, por otro lado, la organización estima dar un paso más y relacionar el conocimiento geográfico de la región de manera que el usuario final se enriquezca de la búsqueda inicial realizada conociendo fenómenos geográficos directos o indirectos a la búsqueda inicial realizada por el usuario.

2. METODOLOGÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

"La información geográfica se ha incrementado exponencialmente en la última década vinculada al desarrollo de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) así como al paradigma del Big Data. A la cantidad de datos –volumen–, la multiplicidad de formatos y fuentes –variedad–, y el constante movimiento –variabilidad– que inicialmente se asocia a este paradigma, se ha sumado el valor –utilidad del dato–, la velocidad –por la cual el dato es generado–, la viscosidad –pluralidad del dato–, la visualización –tiene sentido porque sirve para la toma de decisiones– y la veracidad –calidad– de la información. El IGEAR entendió que la forma de gestionar la información geográfica del territorio pasaba necesariamente por aplicar el paradigma IDE para asumir un control eficiente. De esta manera, el descubrimiento, la visualización, la descarga, así como el encadenamiento de servicios geográficos le convertían en una plataforma transversal de información (geográfica) para la acción del Gobierno" (Martínez, R. López, F. Portolés, D., 2020).

IDEARAGON es la plataforma y paradigma que enfatiza la explotación de recursos de información geográfica para que sean interoperables. El alcance de la interoperabilidad se ha de lograr desde diferentes ópticas; los elementos y componentes de una IDE. Una vez desplegados adquiere un elemento clave, la capacidad para el descubrimiento de la información geográfica. Como IDE regional surte de información geográfica y accede a los servicios geográficos interoperables proporcionados a otra escala ya sean competencial o estrictamente de trabajo.

La metodología empleada es híbrida combinando diferentes estrategias para el descubrimiento y presentación de resultados. Parte de un conjunto de fuentes de información utilizadas para la búsqueda y descubrimiento de información geográfica de Aragón que se podría resumir de forma unívoca en el conjunto de fenómenos geográficos almacenados en la base de datos geográfica de IDEARAGON.

Lejos de realizar un listado extenso y poco funcional dado que la información geográfica es incremental y varía con rapidez en IDEARAGON, se hace necesario detallar el conjunto de técnicas que se explotan para el descubrimiento de fenómenos geográficos. Este conjunto de técnicas de búsqueda se clasifica en directas, indirectas o encadenadas.

- Directas. Son aquellas relacionadas con pares o conjuntos de pares de coordenadas ya sean geográficas o UTM. Se resuelven a partir del uso de servicio web estándar WCTS, WCS o con búsquedas directas basadas en sentencia de Postgis ya sea en información vectorial o ráster. Este tipo de búsquedas son muy eficientes y solo depende de la precisión de la consulta espacial de entrada solicitada por el usuario para responder con la envolvente geográfica, el perfil o la altitud de un determinado punto.
- Indirectas. Son más heterogéneas porque varían de la fuente y el tipo de información. Muchas de ellas se podrían considerar directas porque se realizan sobre identificadores codificados o estandarizados,

pero son indirectas porque descubren o ubican un determinado fenómeno geográfico que puede ser más o menos extenso en el espacio, que puede tener variantes en su búsqueda literal o espacial o que puede hablar de parte o todo su contenido. En función de la tipología, los servicios web estándar utilizados son:

  - CSW para el descubrimiento y consulta de información geográfica mediante las consultas de los metadatos a nivel de dato geográfico o servicio geográfico.
  - WFS para el descubrimiento, consulta y descarga de información geográfica vectorial.
  - WFS-g o Gazetteer para el descubrimiento, consulta y descarga específica de toponimia o nombres geográficos.
  - WCS para el descubrimiento, consulta y descarga de información geográfica ráster.
- Encadenadas. Implican la realización de una operación espacial básica o avanzada sobre el fenómeno geográfico buscado por el usuario que le permite consultar información relacionada. Todas se resuelven a partir de servicio web estándar WFS, WCS o con búsquedas directas basadas en sentencia de Postgis ya sea en información vectorial o ráster. En función de la operación espacial aplicada se realizan las siguientes relaciones espaciales según la tipología establecida en el documento de Buenas Prácticas de W3C "Spatial Data on the Web Best Practices":
  - Topológica.
  - Direccional.
  - Distancia.

El usuario del servicio web de búsquedas de IDEARAGON no es consciente de la permeabilidad de esa tipología como es lógico. Su búsqueda sobre una caja blanca posibilita el acceso a la información gracias a un par de servicios web que aglutina esta variedad de consultas. Los servicios web implementados en Java son:

- *SimpleSearchService* es el servicio Web que permite la búsqueda de lugares geográficos (calles, municipios, humedales, topónimos, etc.) a partir de un nombre o código.
- *SpatialSearchService* es el servicio Web que permite la obtención de las features, de un conjunto de capas, relacionadas espacialmente con una geometría dada. Las capas, almacenadas en tablas PostGIS, y el tipo de relación espacial que interesa buscar en cada una de ellas se definen en una tabla de base de datos.

2.1. Servicio web *SimpleSearchService*: Arquitectura y operaciones disponibles

El servicio web *SimpleSearchService* consta de tres módulos:

- Simple: permite la búsqueda de cualquier tipo de lugar geográfico a partir de un nombre o código. En función de la naturaleza del texto de búsqueda se buscará en un subconjunto de capas u otro y en un determinado orden.
- Typed: permite la búsqueda de un tipo de feature concreto.
- Geonames: para la búsqueda exclusivamente de topónimos.

Las búsquedas se realizan en las distintas bases de datos Postgresql en vistas con idéntica estructura denominadas v_busquedas. Por cuestiones de eficiencia tecnológica, los topónimos se incluyen en una vista separada denominada v_busquedas_topo. En el caso de la búsqueda de coordenadas, en caso de que las coordenadas buscadas no estén en EPSG:25830 se transforman a dicho SRS mediante la función ST_Transform de PostGIS. Su diagrama de arquitectura se muestra en la Figura 1.

Las operaciones disponibles se deben realizar mediante petición HTTP GET. Pueden ser:

- Búsqueda simple sobre todos los feature types mediante la URL /SimpleSearchService/services bajo una serie de parámetros especificados en la documentación técnica localizada en: https://gitlab.com/igear_publico/simplesearchservice.

- Búsqueda tipificada sobre un tipo de dato en concreto mediante la URL /SimpleSearchService/typedSearchService bajo una serie de parámetros especificados en la documentación técnica citada. La respuesta obtenida seguirá la misma estructura que para las búsquedas simples. En este tipo de búsquedas si se encuentran resultados realizando una búsqueda exacta (en base a la fonética) no se realizan búsquedas de "parecidos". Por tanto, es posible que la misma búsqueda realizada como búsqueda simple arroje más resultados para el tipo de feature de interés que la búsqueda tipificada.

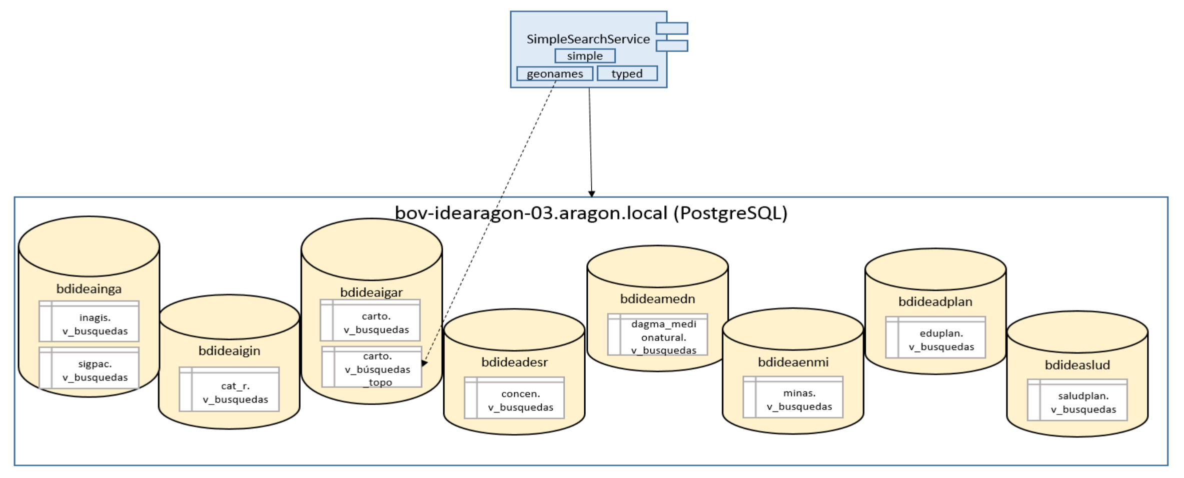


Figura 1. Diagrama de arquitectura del servicio web *SimpleSearchService*.

2.2. Servicio web *SpatialSearchService*: Arquitectura y operaciones disponibles

El servicio web *SpatialSearchService* está configurado para soportar un conjunto de tipos de búsquedas espaciales. Son:

- DV: búsquedas espaciales de la aplicación web Dónde Vivo.
- DVS: búsquedas espaciales de la aplicación web Dónde Vivo Salud.
- RJT_1, RJT_2 y RJT_3: búsquedas espaciales de la herramienta RJT del Visor 2D que habilita la consulta sobre Ordenación del territorio, Urbanismo, Ambiental y Sectorial respectivamente.
- FS, FM y OTINFO: búsquedas espaciales de las herramientas de simulación de Cartofor, FiremanagerWS y del visor de informes territoriales OTINFO respectivamente.

Cada tipo de búsqueda corresponde a una tabla de base de datos en la que se definen las tablas PostGIS sobre las que buscar y las operaciones espaciales a realizar. Su diagrama de arquitectura se muestra en la Figura 2.

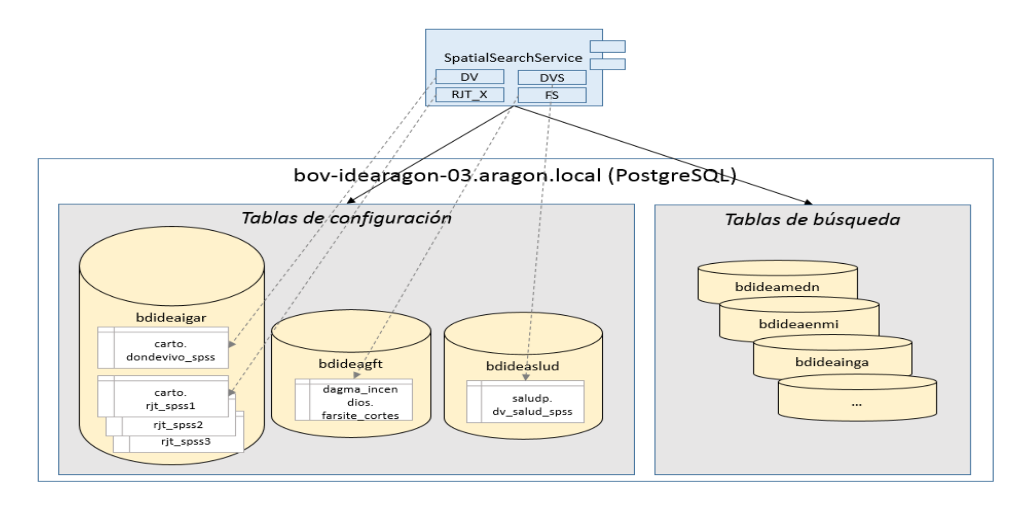


Figura 2. Diagrama de arquitectura del servicio web *SpatialSearchService*.

Las operaciones disponibles se deben realizar mediante petición HTTP GET con la URL /SpatialSearchService/services. Pueden ser:

- Búsqueda espacial sobre feature almacenada en PostGIS. Esta operación se puede realizar tanto por operación GET como por POST bajo los parámetros especificados en la documentación técnica localizada en: https://gitlab.com/igear_publico/spatialsearchservice. La respuesta obtenida será un JSON con una estructura fijada en la documentación técnica citada anteriormente.
- Búsqueda espacial sobre una geometría. Esta operación se debe realizar por POST bajo los parámetros especificados en la documentación técnica citada anteriormente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

El resultado aplicado es un buscador general dentro del portal de IDEARAGON y de las aplicaciones web del mismo, en especial, visores web. Como servicio web además se está utilizando en otras aplicaciones de Gobierno de Aragón que no dependen del IGEAR sea el caso de aplicaciones de Aragón Open Data, Urbanismo, Sanidad o Educación como ejemplos más evidentes. Un buscador extenso que dé respuesta al usuario. La respuesta SOAP del término "Valdespartera" en Aragón que arroja un centro de salud, un centro educativo y 19 topónimos ubicados por la geografía aragonesa como botón de muestra del enriquecimiento que proporciona esta estrategia de descubrimiento de información (Figura 3):

https://idearagon.aragon.es/SimpleSearchService/services?texto=valdespartera&inicio=1&total=100&maxResults=20&app=v2D


```
▼<SOAP-ENV:Envelope xmlns:SOAP-ENV="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/">
  <SOAP-ENV:Header/>
 ▼<SOAP-ENV:Body>
  ▼<SearchResponse>
   ▼<SearchResult>
      <Type>Localidad</Type>
      <Count>0</Count>
    </SearchResult>
   ▼<SearchResult>
      <Type>BusMun</Type>
      <Count>0</Count>
    </SearchResult>
   ▼<SearchResult>
      <Type>BusCallUrb</Type>
      <Count>0</Count>
    </SearchResult>
   ▶<SearchResult>
    ...
    </SearchResult>
   ▶<SearchResult>
    ...
    </SearchResult>
   ▶<SearchResult>
    ...
    </SearchResult>
   ▼<SearchResult>
      <Type>v206_centros_salud</Type>
      <Count>1</Count>
      <List>VALDESPARTERA###100## </List>
    </SearchResult>
   ...
   ▼<SearchResult>
      <Type>toponimo</Type>
      <Count>19</Count>
      <List>Valdespartera#Mallén#625167.14:4642063.226#18423#50160#18518 Valdespartera#La
      Almolda#728145.78:4605175.912#62209#50022#62507
      Valdespartera#Peñalba#744760.357:4589867.578#218555#22172#1174759
      Valdespartera#Ayerbe#0.0:0.0#298305#22039#1424188
      Valdespartera#Belchite#693086.382:4568894.614#34587#50045#34707
      Valdespartera#Zaragoza#672192.711:4610239.78#44009#50297#44165 Valdespartera#Lupiñén-
      Ortilla#687423.471:4670866.219#284307#22905#1345219 Valdespartera#Villafranca de
      Ebro#703415.649:4605266.232#62146#50285#62443
      Valdespartera#Monzón#756250.545:4647564.451#143937#22158#1091424 </List>
    </SearchResult>
  </SearchResponse>
 </SOAP-ENV:Body>
</SOAP-ENV:Envelope>
```


Figura 3. Respuesta del servicio web *SimpleSearchService* a la búsqueda del término "Valdespartera".

El despliegue de este servicio de descubrimiento se alimenta de respuestas que arrojan plataformas horizontales como Aragón Open Data o portales, visores y aplicaciones sectoriales de Urbanismo, Sanidad o Educación del Gobierno de Aragón que aportan su información a través del dato abierto o servicio web. En el caso de Aragón Open Data se realiza acceso directo a la tabla de datos de fianzas de alquiler de locales o viviendas a través de la consulta por callejero o localidad. En el caso de urbanismo, sanidad y educación se

accede a la información de consulta de planeamiento urbanístico (clasificación y calificación del suelo), áreas de salud, zonas básicas de salud (ZBS) e instalaciones sanitarias, zonas educativas e instalaciones sanitarias respectivamente. En el caso de Sanidad se accede a la información sobre determinantes de salud, mortalidad y morbilidad relacionada a la Zonas Básicas de Salud. A corto plazo se accederá a la información estadística sobre centros educativos en los diferentes grados de formación.

3.2. Discusión

Uno de los objetivos del IGEAR es dar un paso más en el descubrimiento de información a través de la relación de la información geográfica mediante la aplicación de grafos de conocimiento espacial. El resultado actual es operativo, pero adolece de la necesidad efectiva de relacionar información que necesariamente está vinculada a un fenómeno geográfico buscado por el usuario.

La evolución de la interfaz pasa por el enriquecimiento del paradigma IDE a través de la aplicación de la flexibilidad de un grafo de conocimiento. Ese grafo de conocimiento ha de contar con el necesario uso aplicado de las evoluciones de los estándares geográficos abiertos a través de API Rest buscando siempre una integración pragmática desde otros servicios o aplicaciones web.

El salto adelante tiene su palanca de cambio en la flexibilidad con la implantación de un grafo de conocimiento. Un salto que permita que cualquier hecho sobre lugares, objetos, personas esté conectado por entidades y relaciones sean dirigidas o no. Una forma de conectar y unificar de manera significativa la información y hacerla interrogable de manera natural para las personas con el fin de lograr una IDE más inteligente. El Grafo de Conocimiento es una realidad ya para la búsqueda de los sistemas de interrogación de las organizaciones inteligentes. Un Grafo de conocimiento geográfico interrogable que permita desplegar estrategias de búsqueda personalizadas basadas en el razonamiento y la capacidad de contextualización de los sistemas.

Una web inteligente mejorará, por un lado, el proceso de búsqueda, descubrimiento de conocimiento y de personalización de los contenidos en las organizaciones. Por otro lado, la aplicación de un grafo de conocimiento en la estrategia actual de descubrimiento de IDEARAGON permitirá a las personas y a las máquinas hacer preguntas, presentar resultados de manera significativa o hacer posible razonar sobre ellos con el fin de refinar la propia búsqueda, así como proporcionar contextos persistentes, pertinentes y concretos. Y, finalmente, facilitará información geográfica enriquecida para cualquier tipo de consulta basada en recomendaciones ajustadas y personalizadas al perfil y los intereses de la componente social de toda IDE.

4. CONCLUSIONES

IGEAR cumple un doble objetivo con la actual estrategia de descubrimiento. El primero, explotar al máximo el paradigma IDE bajo el prisma de la interoperabilidad. El segundo, dotar de la mayor flexibilidad al componente geográfico y tecnológico habilitado por los estándares web geográficos existentes a tal efecto. En suma, asumir y practicar una estrategia de descubrimiento dentro del paradigma IDE al objeto de facilitar la respuesta espacial que ha de dar a la componente social de toda IDE, en especial, de los agentes que han de realizar y ejecutar las políticas públicas dentro del territorio aragonés.

5. BIBLIOGRAFÍA

Abad, P. Bernabé M.A. y Rodríguez, A. (2012): Compartir: la solución está en las Infraestructuras de Datos Espaciales. En M.A. Bernabé Poveda y C.M. López Vázquez (Eds.), *Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales* (pp. 41-53). Madrid, UPM Press, Serie científica. ISBN: 978-84-939196-6-5

Brock, D., Schuster, E. y Allen, S. (2004): An Introduction to semantic modeling for logistical Systems. *Journal of Bussines Logistics*, 26(2), 97-117. https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2005.tb00207.x

Harari, Y. N. (2014): *Sapiens. De animales a dioses: Una breve historia de la humanidad*. Barcelona, Debate. ISBN: 978-84-999242-1-2

Martínez, R., López, F. y Portolés, D. (2020): Visor del Régimen Jurídico del Territorio: Herramienta para la toma de decisiones en la gobernanza del territorio. *Geographicalia*, 72, 27-38. Zaragoza. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2020724466

McDonald, K. Enloe, Y. y Liping, D. (2006): A Gateway to Support Interoperability of OPeNDAP and OGC Protocols". *IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium,* 301–304. Denver. http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2006.82

Lewis, G. Morris E. y Simanta S. (2008): Why Standards Are Not Enough to Guarantee End-to-End Interoperability". En *7ma International Conference on Composition-Based Software Systems*, 164-173. Madrid. https://doi.org/10.1109/ICCBSS.2008.25

Tandy, J., van den Brink, L. y Barnaghi, P. (2017): Spatial Data on the Web Best Practices. En *W3C Working Group Note*. https://www.w3.org/TR/sdw-bp

Young, P., Chaki, N. y Berzins, V. (2003): Evaluation of Middleware Architectures in Achieving System Interoperability". En *International Workshop on Rapid Systems Prototyping*, 108–116. San Diego. http://dx.doi.org/10.1109/IWRSP.2003.1207037

Zborovskiy, M. (2006): Representing and Manipulating Spatial Data in Interoperable Systems and its Industrial Applications. En *Tesis de Maestría, Massachusetts Institute of Tecnology*. Massachusetts. http://hdl.handle.net/1721.1/35099



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 607-613

Estimación de la exactitud planimétrica de la red de drenaje derivada de un modelo digital de elevaciones (MDE)

J.F. Reinoso Gordo[1], F.J. Ariza López[2]

[1] *Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería, Universidad de Granada. ETSICCP, Campus de Fuente Nueva, 18071, Granada.*
[2]*Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Universidad de Jaén. ETS. Campus Las Lagunillas s/n, 23071, Jaén.*

jreinoso@ugr.es, fjariza@ujaen.es

RESUMEN: Los modelos digitales de elevaciones (MDE) son uno de los productos cartográficos más utilizados en la Ingeniería Civil, Medio Ambiente, Hidrología, Geología, Prevención de desastres naturales, etc. Aunque son muchos los análisis y algoritmos que se aplican sobre ellos, la mayoría de las veces se desconoce la calidad del producto derivado de los mismos, lo que podría llevarnos a afirmar que no se tiene un conocimiento adecuado de la calidad funcional del MDE (se suele aplicar un algoritmo, asumir que el resultado es correcto y continuar con el análisis). Es necesario disponer de herramientas que informen de la calidad esperada en la producción de redes de drenaje, mapas de pendientes, de sombras, etc. El presente trabajo estima la exactitud posicional planimétrica de una red de drenaje extraída de un MDE. Se parte de un MDE de referencia (MDEref) del que, tras aplicar el algoritmo A, se obtiene su red de drenaje (RDref), utilizada como verdad terreno. El MDE del que se quiere conocer su calidad funcional (MDEpro) tendrá una red de drenaje asociada (RDpro). El emparejamiento automático de las curvas de nivel correspondientes a MDEref y MDEpro (curvas homólogas) permite calcular el área entre las mismas y su desplazamiento horizontal. Dicho desplazamiento horizontal es una estimación bastante aproximada del desplazamiento horizontal existente entre RDref y RDpro, como se muestra en el presente trabajo.

Palabras-clave: MDE, desplazamiento horizontal, curvas de nivel, exactitud.

1. INTRODUCCIÓN

Una gran cantidad de aplicaciones geomáticas usan MDEs como base para elaborar otros productos tales como cartografía, redes de drenaje, soluciones de ingeniería, estudios de planificación urbana, análisis de series temporales, etc. La precisión y exactitud de estos MDEs, requerida para elaborar dichos productos puede variar dependiendo del método de captura de los datos, de la fuente de datos o del modo de procesamiento de los mismos. Por todo ello es necesario disponer de medidas de la exactitud de esos MDEs para poder evaluar MDEs diferentes como son aquellos procedentes de fotogrametría o de tecnología LiDAR. La mayoría de los estudios analizan la variable altura (Gao, 1997 y Torlegard, 1986) ya que es la variable más fácil de calcular e interpretar estadísticamente desde un punto de vista de exactitud vertical, cuando se compara un MDEpro contra un MDEref. Otros estudios se han enfocado sobre la exactitud de alguna función, como el índice topográfico u objetos hidrológicos (Arial et al., 2008 y Wise, 2007). Sin embargo, pocos estudios se han centrado en estudiar la exactitud horizontal inherente a los MDEs y su relación con objetos derivados de dichos MDEs como pueden ser las redes de drenaje (Reinoso (2010 y 2011). Esta escasez de medidas de exactitud posicional planimétrica se ha debido a la dificultad de implementación y automatización de los algoritmos (McAlister et al., 1996). Un campo de aplicación del desplazamiento horizontal observado en MDEs es el desplazamiento de ladera, que entre sus métodos incluye la medición basada en imágenes tomadas en diferente épocas (Delacourt y otros 2004 y Massonet, y Bencarnino, 2012).

En nuestro trabajo estudiaremos las posibilidades de estimar el desplazamiento horizontal de RDpro con respecto a RDref mediante el desplazamiento horizontal (DH) observado en las curvas de nivel homólogas. El DH entre curvas homólogas puede observarse gráficamente en la Figura 1 que representa las curvas de nivel pertenecientes a 2 MDEs y las áreas grises entre las mismas dan idea del DH de dichas curvas (a mayor área entre curvas homólogas mayor DH).

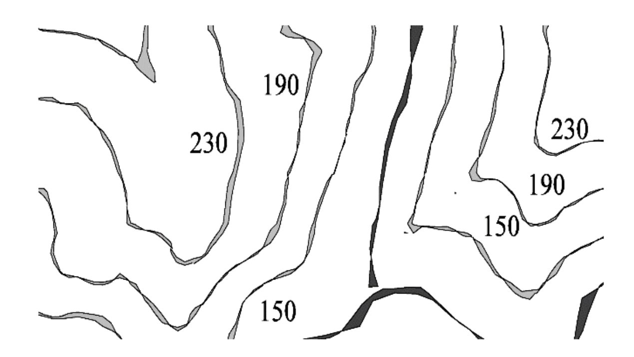


Figura 1. Ejemplo de desplazamiento horizontal entre curvas de nivel homólogas.

2. MÉTODO Y RESULTADOS

En este estudio se ha utilizado como MDEref el MDT25 del Instituto Geográfico Nacional (IGN), cuyo tamaño de celdilla es de 25 m y como MDEpro el MDT200 también del IGN y con un tamaño de celdilla de 200 m. El área de experimentación coincide con los límites de la hoja 1027 del MTN 1:50.000 que se localiza en Sierra Nevada (Granada) y cuya ortoimagen se muestra en la figura 2.



Figura 2. Ortoimagen de la zona montañosa de este estudio (Sierra Nevada, Granada).

El procedimiento de estimación se ha realizado en 2 fases: en la primera se ha calculado el DH real entre una muestra de la red de drenaje existente en la zona, y en la segunda se han obtenido las curvas de nivel homólogas y el DH conforme al algoritmo desarrollado en Reinoso, 2011. Finalmente se han comparado el DH determinado por ambos procedimientos.

2.1. Desplazamiento horizontal de una muestra de la red de drenaje

Mediante el algoritmo de Grass r.watershed en el entorno de QGIS se ha generado la red de drenaje de MDEref (Red_25) y de MDEpro (Red_200) sobre un mapa de sombras que permite una mejor identificación del relieve existente (Figura 3).

Como se puede observar, la longitud de los talwegs Red_25 es mayor que la de Red_200, por lo que en el momento de hacer el muestreo habrá que acortar los talwegs de Red_25 para que queden en las proximidades de los extremos de Red_200. En la Figura 4 se muestran los tramos seleccionados para calcular el DH.

Las líneas auxiliares que no corresponden a parte de los talwegs se han utilizado para crear polígonos que facilitarán el cálculo de las áreas encerradas por cauces homólogos. Dicho cálculo se lleva a cabo mediante la operación booleana de diferencia simétrica dando lugar a las superficies coloreadas que aparecen en la Figura 5.

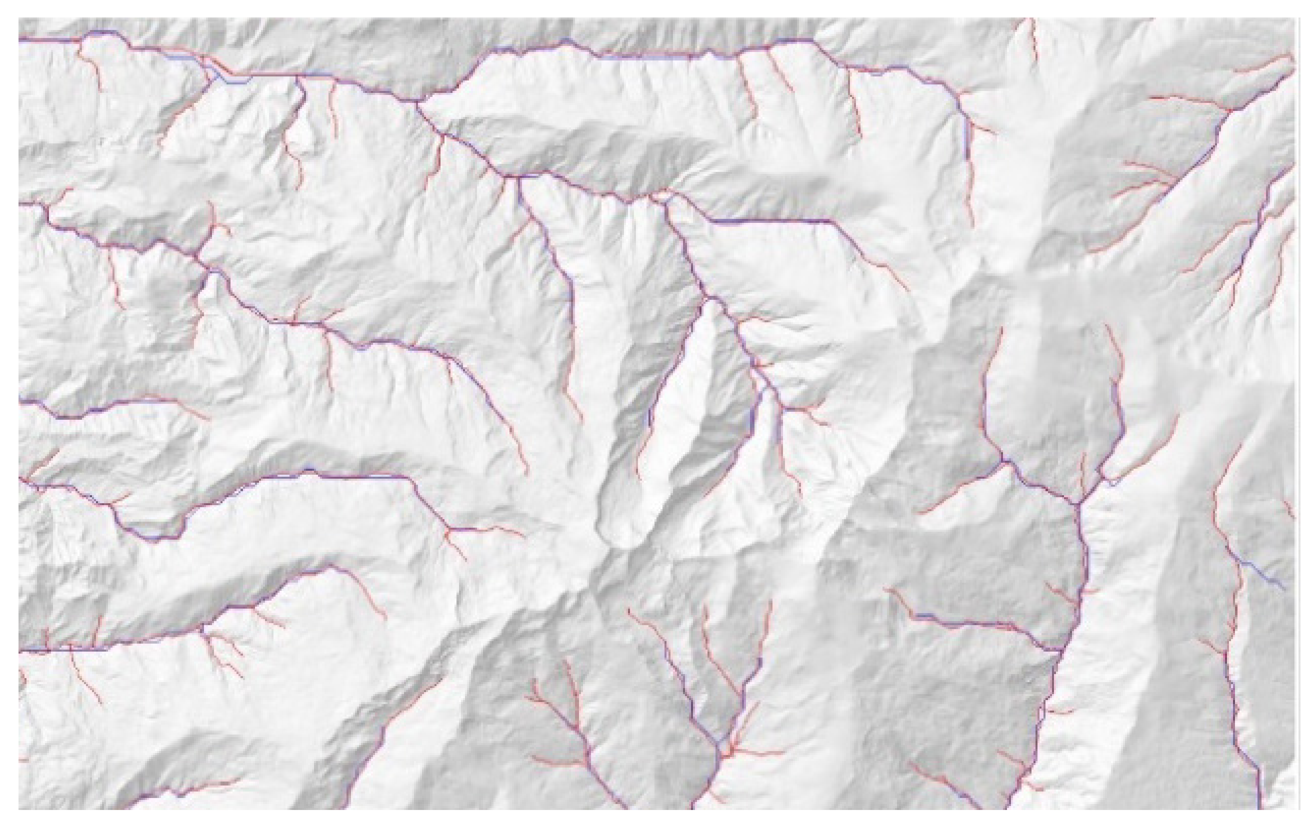


Figura 3. Red de drenaje derivada de MDEref y MDEpro. Red_25 aparece en rojo y Red_200 en azul.

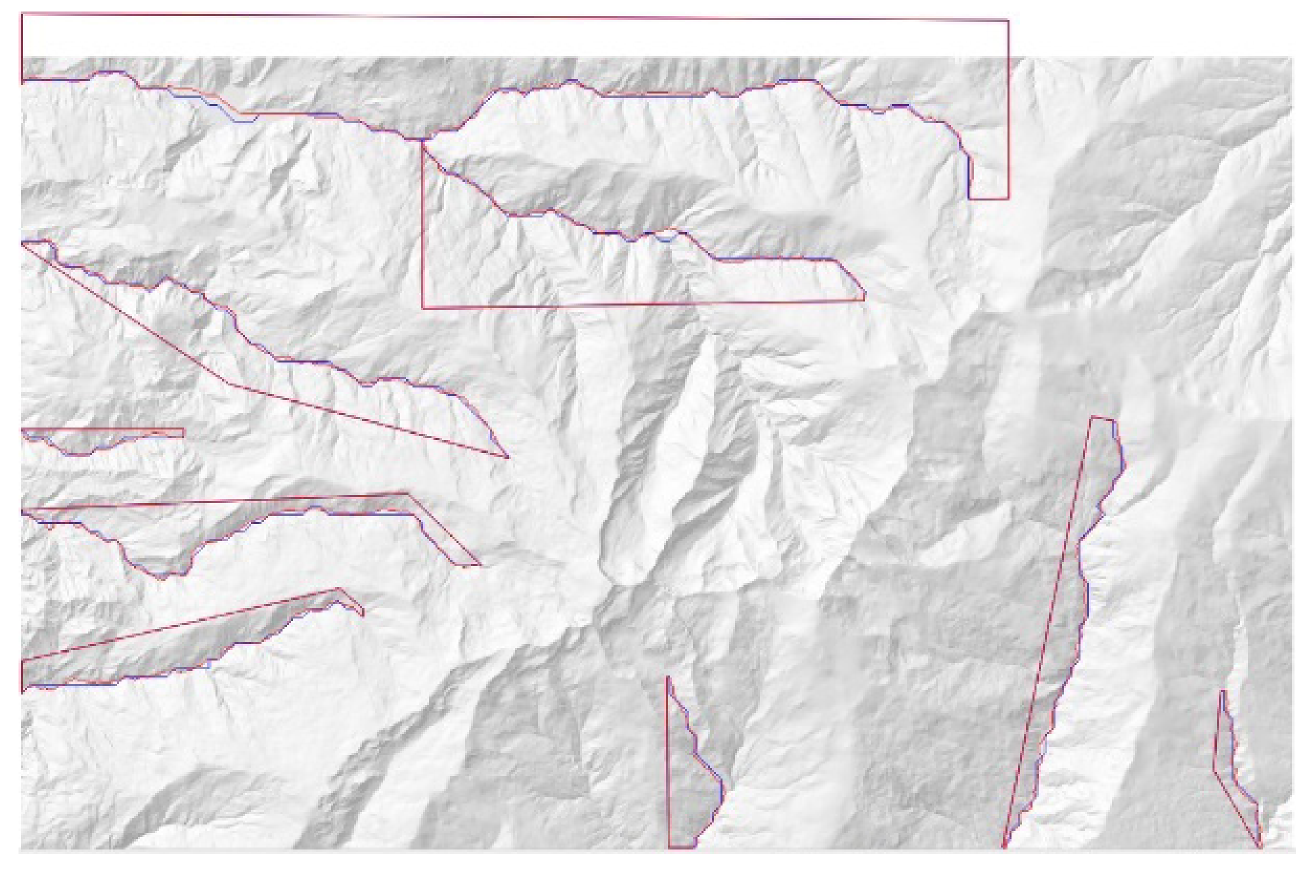


Figura 4. Muestra de los tramos de cauce usados para calcular el DH.

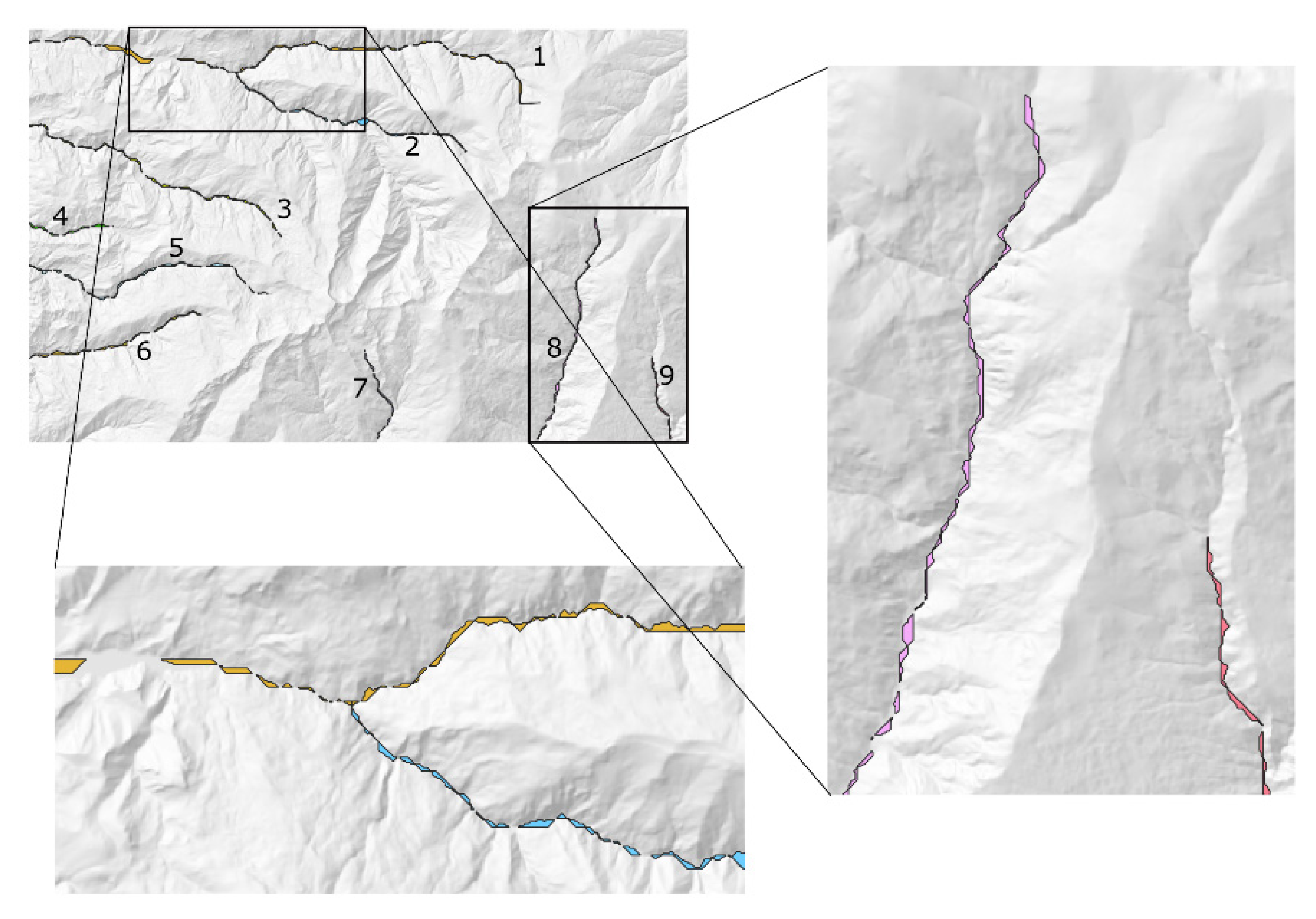


Figura 5. Área entre muestra de cauces homólogos derivados de Red_25 y Red_200.

El desplazamiento de cada tramo de cauce se ha determinado como el cociente entre el área diferencial definida por los talwegs de sendas redes y su semiperímetro, considerando este aproximadamente como la longitud media de dicho tramo. Los valores resultantes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Desplazamiento horizontal entre los talwegs derivados de Red_25 y Red_200

Tramo de cauce	*Área (m^2)*	*Perímetro (m)*	*DH (m)*
1	1.387.542,40	50.092,00	55,40
2	518.111,38	24.027,33	43,13
3	566.680,37	27.520,55	41,18
4	189.517,29	7.826,34	48,43
5	526.955,93	23.983,42	43,94
6	401.553,05	16.898,16	47,53
7	185.051,77	9.160,39	40,40
8	476.625,66	22.576,19	42,22
9	177.297,60	8.382,76	42,30
TOTAL	4.429.335,43	190.467,13	**46,51**

2.2. Desplazamiento horizontal de curvas homólogas

Para el cálculo del DH entre curvas homólogas se han alineado MDEref y MDEpro mediante el algoritmo “Alinear rásters” de QGIS tomando como tamaño de celdilla 25 y límites de la extensión los propios del MDEref. El remuestreo del MDEpro se ha realizado mediante el método del vecino más próximo, lo que ha dado lugar a la forma angulosa de las curvas de nivel de MDEpro (color azul) y más suavizadas en el caso

MDEref (color rojo).

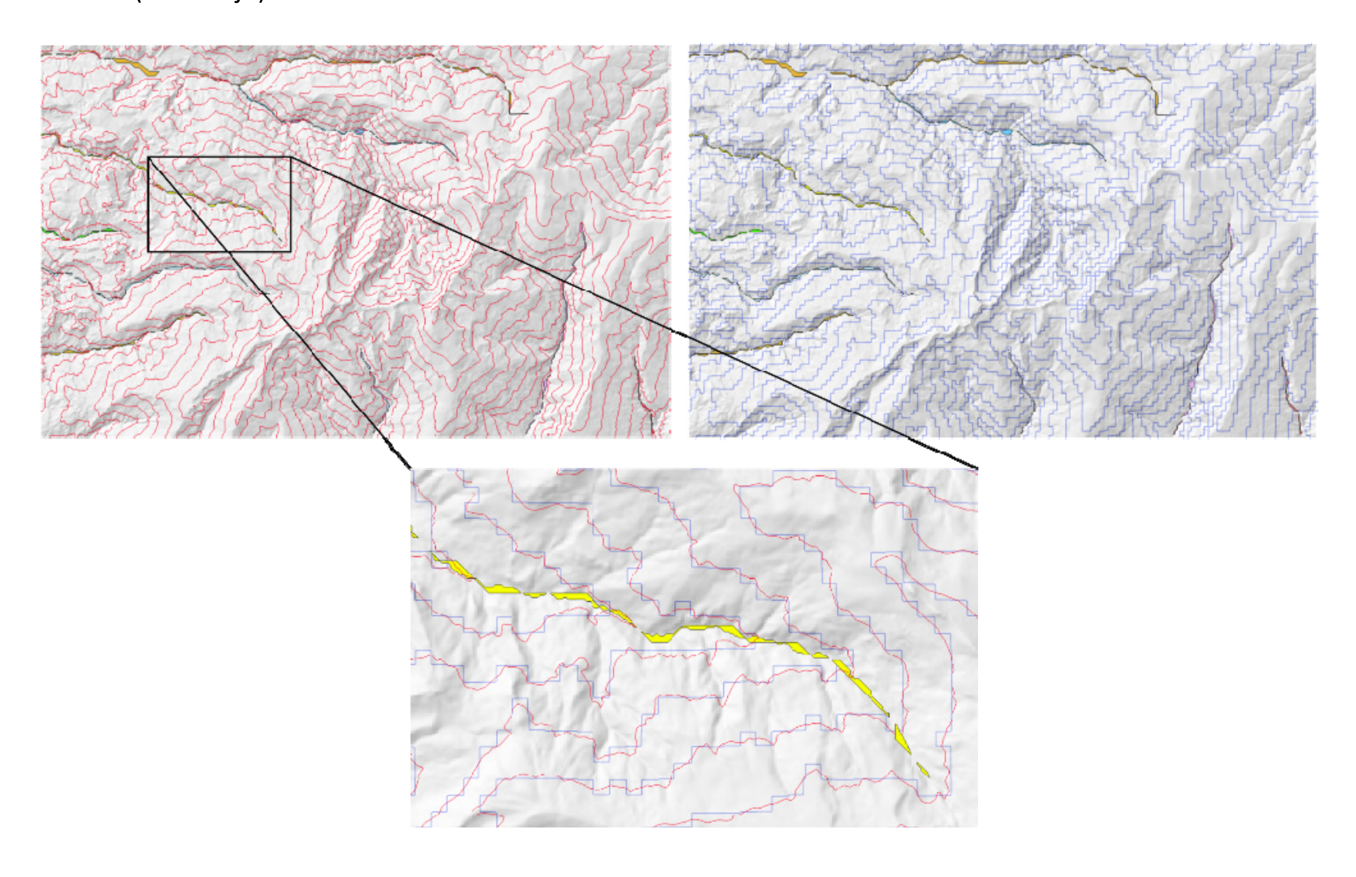


Figura 6. Curvas de nivel homólogas calculadas sobre MDEref (color rojo) y MDEpro (color azul). La imagen inferior muestra un detalle de superposición de dichas curvas homólogas en una zona donde también aparece el DH de uno de los tramos de cauce.

La aplicación del algoritmo automático de Reinoso (2011) permite obtener el DH del conjunto de las curvas de nivel homólogas calculadas sobre MDEref y MDEpro (Figura 7). La Tabla 2 muestra el DH por cada pareja de curvas de nivel homólogas con indicación de su altitud y la media ponderada de DH estimado para el conjunto de curvas.

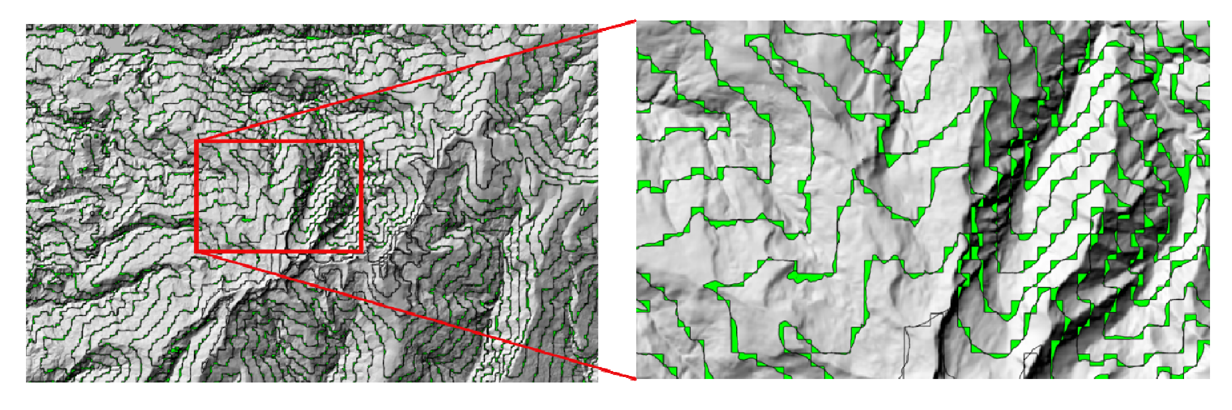


Figura 7. Representación gráfica del DH entre curvas homólogas, ilustrado como el área entre dichas curvas homólogas.

Tabla 2. Estimación del DH mediante el método de curvas de nivel homólogas

Altitud curvas (m)	800	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000
DH (m)	50,24	44,40	40,66	40,84	40,37	41,06	40,78
Altitud curvas (m)	2.200	2.400	2.600	2.800	3.000	3.200	3.400
DH (m)	39,40	39,26	39,73	38,62	42,21	43,33	44,66
	HD ponderado (m)		**41,03**				

Si se compara el DH entre los talwegs derivados de Red_25 y Red_200 (Tabla 1), obtenido sobre la muestra de los tramos de cauce seleccionados (Figura 5), con el DH calculado con el método de curvas de nivel de Reinoso, 2011 (Tabla 2), se observa que hay una diferencia de 5,48 m, que supone un error del 11,8% en la estimación del DH por el método de Reinoso (2011).

3. CONCLUSIONES

Conocer la exactitud planimétrica de una red de drenaje es fundamental para muchas aplicaciones relacionadas con la Ingeniería Civil y la Ingeniería medioambiental, entre otras; por ejemplo, para la ubicación precisa de una obra de fábrica que cruza una vía de comunicación terrestre o para calcular los límites de inundación ante una avenida, consecuencia de un episodio de lluvia torrencial. No obstante, a priori, no parece que pueda ser un proceso fácilmente automatizable: habría que establecer la correspondencia unívoca entre los talwegs de un modelo de referencia (verdad terreno) y los del modelo cuya exactitud planimétrica se pretende conocer. Además, habría que acortar las longitudes de algunos de los tramos de cauce considerados para que la medición de la separación entre ellos no fuese sesgada. Ante esta dificultad, en este trabajo, se ha estimado la mencionada exactitud planimétrica de un modo indirecto, concretamente mediante el método de curvas de nivel de Reinoso (2011), que automatiza todo el proceso, siendo únicamente necesarias, como variables de entrada, los respectivos MDEs de los que se deriva la red de drenaje. Además, dicho método no necesita generar la red de drenaje, sino solamente las curvas de nivel. Comparando la estimación hecha mediante curvas de nivel con el desplazamiento horizontal, obtenido a partir de un muestreo de tramos de cauce de las redes RDref y RDpro, se ha observado que el error cometido por el método de curvas de nivel homólogas ha sido solo del 11.8%, lo que hace considerar a este método un buen estimador para generar redes de drenaje con gran precisión planimétrica. No obstante, para reforzar las hipótesis y resultados expuestos en el presente estudio sería necesario utilizar un mayor volumen de datos y tramos de muestreo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado como parte del proyecto de investigación "Functional Quality of Digital Elevation Models in Engineering" financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, en la convocatoria 2019 de Proyectos de I+D+i, dentro del Programa Estatal de generación de conocimiento científico y tecnológico del sistema de I+D+i. PID2019-106195RB-I00/AEI/10.13039/501100011033 (https://coello.ujaen.es/investigacion/web_giic/funquality4dem/).

4. BIBLIOGRAFÍA

Aryal, S.K., y Bates, B.C. (2008). Effects of catchment discretization on topographic index distributions. *Journal of Hydrology,* 359, 150–163. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.025

Bencardino, M. (2012). Preparation and processing of optical images (photographs and satellite) for the determination of landslide displacement field. En *Proceedings of the Seventh International Conference on Informatics and Urban and Regional Planning INPUT*, Cagliary, Italy. 1202–1214.

Delacourt, C., Allemand, P., Casson, B. y Vadon, H. (2004). Velocity fields of the “La Clapiere” landslide measured by the correlation of aerial and QuickBird satellite images. *Geophysical Research Letters*, 31(15). https://doi.org/10.1029/2004GL020193

Gao, J. (1997). Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale. *International Journal of Geographical Information Science* 11(2), 199–212. https://doi.org/10.1080/136588197242464

Reinoso, J.F. (2010). A priori horizontal displacement (HD) estimation of hydrological features when versioned DEMs are used. *Journal of Hydrology*, 384(1-2), 130–141. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.017

Reinoso, J.F. (2011). An algorithm for automatically computing the horizontal shift between homologous contours from DTMs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), 272–286. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.10.008

Torlegard, K., Ostman, A. y Lindgren, R. (1986). A comparative test of photogrammetrically sampled digital elevation models. *Photogrammetria*, 41(1), 1–16. https://doi.org/10.1016/0031-8663(86)90002-5

Wise, S. (2007). Effect of differing DEM creation methods on the results from a hydrological model. *Computers & Geosciences*, 33(10), 1351–1365. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.003



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 614-623

Aplicaciones de *Clasificador Catastral*: un complemento de QGIS para la clasificación de los usos del suelo urbano a partir de información catastral

N. Shurupov[1], R. Molinero-Parejo[1], V.M. Rodríguez-Espinosa[1], F. Aguilera-Benavente[1]

[1] Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Universidad de Alcalá. C. Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares.

nikolai.shurupov@edu.uah.es, ramon.molinero@uah.es, victor.rodriguez@uah.es, f.aguilera@uah.es

RESUMEN: La Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de la Dirección General del Catastro (DGC) ofrece información de carácter urbano con un gran potencial, dado su alto nivel de detalle y su continua actualización, conformándose como base para numerosos trabajos aplicados a estudios sobre planificación urbana, transporte y movilidad, distribución de la población, exposición a riesgos naturales y antrópicos, y localización óptima de servicios, entre otros. Sin embargo, la explotación de estos datos conlleva dificultades debido a la complejidad de su estructura y a la necesidad de un tratamiento previo a su utilización, por lo que su uso entre usuarios no especializados es limitado. Este estudio presenta la herramienta Clasificador Catastral (CC), un complemento desarrollado para QGIS que permite sortear las barreras anteriormente mencionadas, facilitando la realización de distintos niveles de clasificación de los usos del suelo urbano a nivel de parcela para los municipios españoles disponibles en la DGC. Así mismo, explora las diversas aplicaciones que puedan derivarse de su uso desde una perspectiva de análisis espacial con Sistemas de Información Geográfica (SIG). Concretamente, se muestran algunas posibilidades que ofrecen los distintos niveles de clasificación de usos del suelo como: (1) análisis de la distribución y especialización morfológica y funcional; (2) análisis de la diversidad y el paisaje urbano; (3) clasificación de las ciudades mediante análisis de la composición de los usos del suelo; (4) instrumento de apoyo a la docencia para el uso de información catastral.

Palabras-clave: clasificación, usos del suelo, parcela, catastro.

1. INTRODUCCIÓN

Los entornos urbanos juegan un papel fundamental en las sociedades actuales, pues constituyen el motor del crecimiento en todas sus vertientes (Bettencourt y West, 2010) y albergan a una gran parte de la población que, en contextos como el español, asciende a un 82,2 % de la población total (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2020). Para abordar algunos de los retos de planificación asociados a estos espacios, como la movilidad insostenible, la desigualdad social o las problemáticas ambientales (Banister, 2011; Grimm et al., 2008; Temelová et al., 2017), se requiere de un conocimiento profundo de la distribución espacial de los usos del suelo en estos entornos, necesitando fuentes de información geográfica adecuadas.

A pesar de no ser específicamente una fuente de información sobre los usos del suelo, la información catastral elaborada por la Dirección General del Catastro (DGC) ofrece datos muy detallados y de actualización continua, de la que es posible derivar información de usos del suelo urbano (Santos Preciado, 2015a). Esto es posible gracias a que, además de la función como registro administrativo de los bienes inmuebles urbanos, rústicos y de características especiales (DGC, 2022), dicha base de datos también ofrece una información espacial y temática muy rica acerca de parcelas, edificaciones y tipologías constructivas. Ha sido empleada en múltiples estudios urbanos, como la desagregación poblacional (Santos Preciado, 2015a); la descripción de la estructura urbana (Santos Preciado, 2015b); la simulación de cambios de usos del suelo en ámbitos urbanos (Barreira-González et al., 2019); la caracterización de ciudades de 15 minutos en función de la mezcla de usos o la diversidad urbana (Carpio-Pinedo et al., 2018; Quílez Aznar, 2021); o el análisis de procesos de dispersión urbana en ciudades intermedias (Sánchez-Ondoño y Cebrián-Abellán, 2019).

Sin embargo, una de las dificultades existentes a la hora del uso de la información catastral radica en la elevada complejidad de su modelo de datos, que dificulta su explotación mediante, por ejemplo, un SIG de escritorio. Ello hace necesario recurrir a la implementación de bases de datos espaciales (ver Martín-Jiménez y Rodriguez-Espinosa (2022)), que precisan de un mayor conocimiento técnico y dificultan su aplicación por parte de un amplio grupo de usuarios.

Para intentar paliar las citadas dificultades, y con el objetivo de facilitar la generación de clasificaciones de usos del suelo urbano con máxima resolución temporal y a nivel de parcela, surge la herramienta *Clasificador Catastral* (CC)[1] (Shurupov et al., 2022) en el contexto del proyecto Prueba de Concepto SIM4PLAN. Desarrollado como un complemento para QGIS (dada su política *Open Source*, elevada popularidad, y la activa comunidad de desarrolladores existente), CC ofrece tres tipos de clasificaciones parcelarias, cuyo nivel de desagregación de leyenda se va incrementando. Así, permite realizar desde una clasificación básica con una leyenda de hasta 6 usos urbanos, una intermedia de hasta 14 y, en último lugar, una clasificación personalizada, que permite definir por completo el número y características de los usos a clasificar.

Las clasificaciones parcelarias obtenidas para cualquier municipio español disponible en la DGC pueden servir como datos de partida para el desarrollo de múltiples aplicaciones en el ámbito de los estudios urbanos, haciéndolas accesibles a un conjunto amplio de usuarios. En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo mostrar y discutir algunas de las citadas aplicaciones derivadas, concretamente aquellas relacionadas con: (1) el análisis de la distribución y especialización morfológica y funcional; (2) el análisis de la diversidad y el paisaje urbano; (3) la clasificación de las ciudades mediante análisis de la composición de los usos del suelo; y (4) el apoyo a la docencia para el uso de información catastral. Se muestran ejemplos de cada una de ellas, para el municipio de Alcalá de Henares (Madrid) en los ejemplos de más detalle.

El trabajo se estructura de la siguiente forma: en el epígrafe 2 se presentan los datos necesarios para el funcionamiento de CC y la interfaz de la herramienta. El epígrafe 3 muestra diferentes aplicaciones resultado de clasificaciones parcelarias realizadas con CC. Finalmente, el epígrafe 4 ofrece una breve discusión y conclusiones al respecto.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos catastrales de partida

Los datos catastrales necesarios para generar clasificaciones de usos de suelo urbano se organizan por municipio y se dividen en datos alfanuméricos y geometrías. Los primeros conforman una base de datos única con un formato de fichero propio (*.CAT), que contiene toda la información temática de interés relativa a cada una de las unidades constructivas, construcciones y bienes inmuebles del municipio.

Por lo que respecta a las geometrías, la cartografía catastral contiene distintos ficheros en formato *shapefile* (*.shp) que representan, desde la estructura subparcelaria (volúmenes construidos), hasta la supraparcelaria (manzanas), incluyendo las parcelas catastrales. Así, una manzana puede agrupar varias parcelas, y cada una de éstas, a su vez, podrá contener diferentes edificaciones compuestas por una o más construcciones, correspondiéndose con el fichero CAT tipo 14 (registro de construcción). Ambos ficheros deben suministrarse a CC para poder realizar la clasificación de los usos del suelo de cada parcela en un municipio.

Para mostrar las aplicaciones se emplearán principalmente los datos catastrales del municipio de Alcalá de Henares (Madrid), aunque también se mostrarán aplicaciones en otros ámbitos geográficos y a diferentes escalas de detalle. Toda la información necesaria ha sido descargada de la web de la DGC.

2.2. El complemento *Clasificador Catastral*

CC se divide en dos módulos, uno de tratamiento de datos, que se encarga de incorporar la información catastral de partida (ficheros *.CAT y **.shp*), y un módulo de clasificación, que permite realizar clasificaciones de las parcelas con tres niveles de desagregación temática: (1) básico, hasta 6 clases, basadas en sencillas reglas; (2) intermedio, que incluye usos mixtos y reglas de clasificación con mayor complejidad para un total de hasta 14 usos; y (3) avanzado, que incorpora las reglas del nivel intermedio y, además, permite al usuario construir clasificaciones personalizadas gracias a una interfaz propia. La Figura 1 muestra la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, por sus siglas en inglés) del módulo de tratamiento de datos, así como el de clasificación. Una descripción detallada acerca del funcionamiento de ambos módulos, así como de los procesos de clasificación, pueden encontrarse en Shurupov et al (2022).

[1] Todos los recursos de CC se encuentran disponibles en: https://transurban-uah.github.io/Cadastral_Classifier/

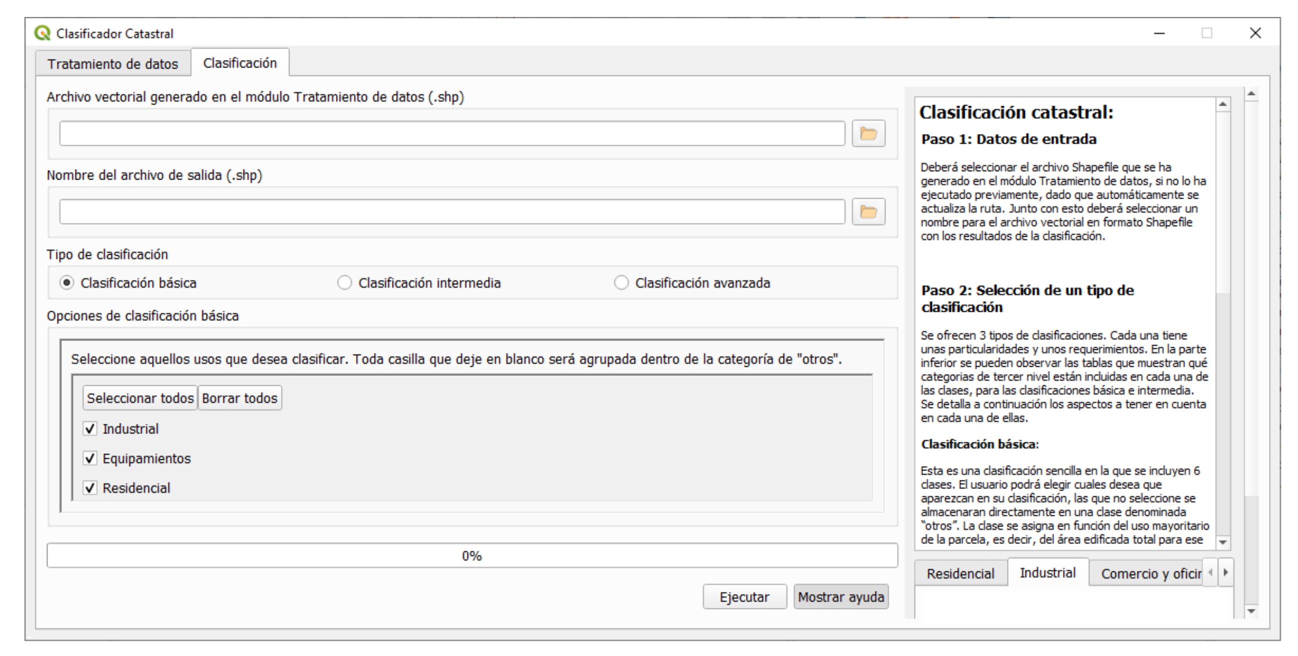


Figura 1. GUI del módulo de clasificación de CC. Clasificación básica. Fuente: elaboración propia.

3. RESULTADOS

3.1. Las clasificaciones a nivel de parcela generadas con CC

A partir de los citados datos catastrales, CC permite la generación de diversos niveles de clasificación de los usos del suelo a nivel de parcela. A modo de ejemplo, en la Figura 2, se muestran los resultados de la clasificación intermedia para el municipio de Alcalá de Henares.

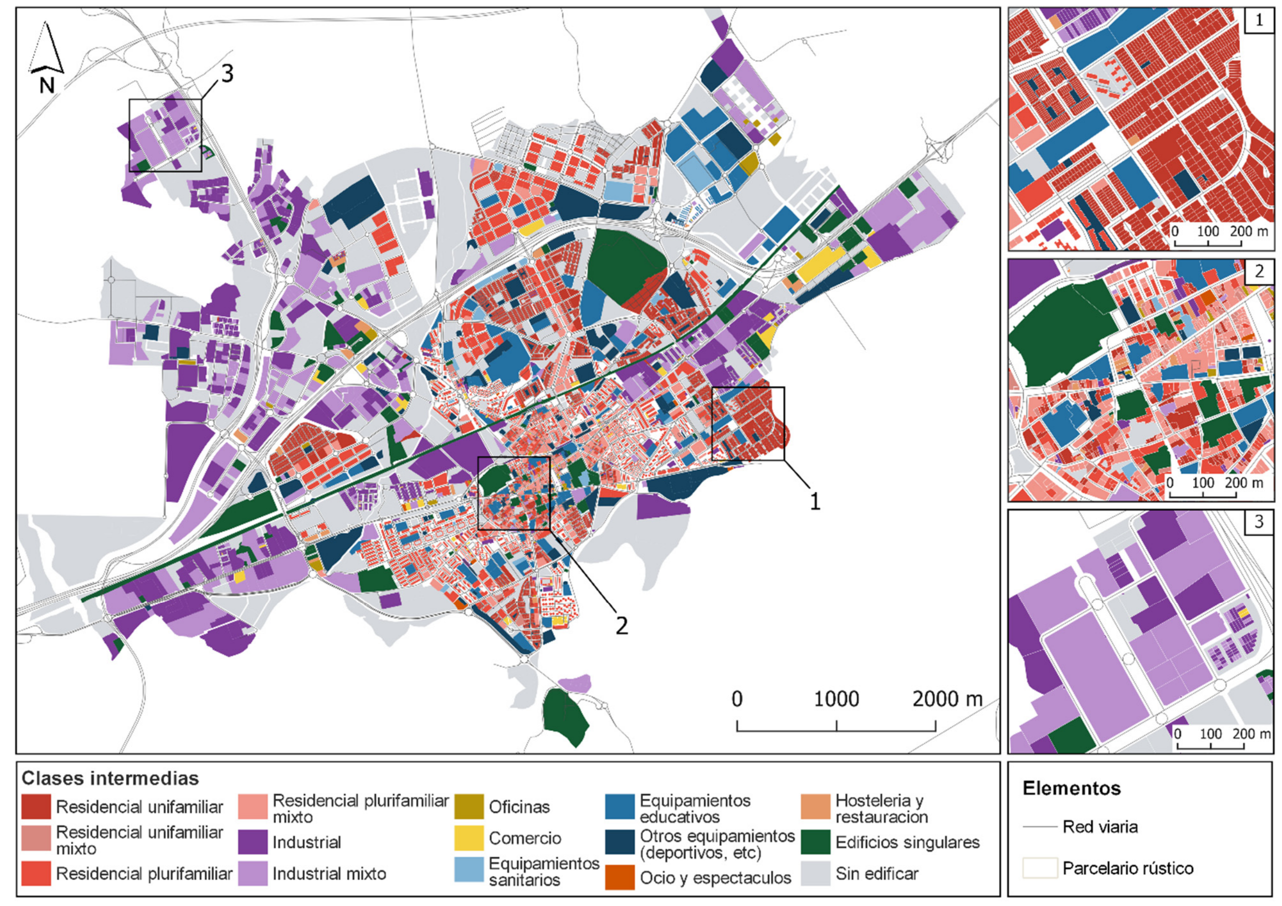


Figura 2. Clasificación intermedia del municipio de Alcalá de Henares. Fuente: elaboración propia.

3.2. Aplicaciones derivadas

El gran interés de las clasificaciones generadas con CC radica en la diversidad de información que ofrece. Además de la clasificación de usos del suelo, cada parcela incluye también información sobre la superficie porcentual que está ocupada, el porcentaje construido de cada una de las clases (según el tipo de clasificación utilizada por el usuario) y el área construida real de cada una de las tipologías constructivas distinguidas por Catastro (máximo nivel de desagregación).

A partir de toda esta información, es posible plantear múltiples trabajos en el ámbito de los estudios urbanos. A continuación, sin ser exhaustivos, se presentan varias de las posibles aplicaciones derivadas en este campo, con el objetivo de mostrar las potencialidades de la herramienta.

3.2.1. Análisis de la distribución y especialización morfológica y funcional de la ciudad

El análisis de las pautas y patrones de uso del suelo en la ciudad es uno de los aspectos de mayor interés para los estudios urbanos. La identificación del grado de especialización de las actividades económicas, usos del suelo, etc., así como la exploración de los factores que explican su distribución y/o concentración dentro de la trama urbana, son líneas de investigación que pueden contribuir a un mejor entendimiento de la complejidad funcional, de usos y relaciones urbanas y a orientar propuestas de intervención y gestión de la ciudad más realistas y mejoradas.

El empleo de indicadores es una práctica extendida en el ámbito local, donde resultan muy útiles en el apoyo a la toma de decisiones en materia de planificación, en el diagnóstico de la ciudad, en el seguimiento y evaluación de la incidencia de determinadas acciones o actuaciones adoptadas, etc. Se trata de medidas sencillas expresadas en forma numérica, pero con una elevada capacidad de síntesis (Rodríguez-Espinosa y Gómez-Delgado, 2008), y referidas a una unidad espacial determinada. Para ello, habitualmente se utilizan las rejillas de referencia que, como apuntan Mora-García y Marti-Ciriquian (2015), permiten una completa cobertura del área de estudio y, sobre todo, facilitan la comparación entre espacios y momentos diferentes. La tendencia en las últimas décadas ha sido incorporar estas mediciones en aspectos como la sostenibilidad (Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, 2012) o las apuestas de las principales agendas internacionales o nacionales (*Agenda 2030*, *Nueva Agenda Urbana UN-Habitat III*; *Agenda Urbana de la Unión Europea*; *Agenda Urbana Española*).

Los resultados de CC han permitido: a) explorar la distribución de un determinado uso o tipología edificatoria concreta en el conjunto de las parcelas catastrales de Alcalá de Henares y, b) evaluar, a través de un índice, el grado de 'especialización' que en este aspecto presentan los diferentes sectores de la ciudad. Como se muestra en la Figura 3, la evaluación se hace utilizando una malla de 200x200 m, resolución espacial de referencia propuesta por la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona (2011) para ciudades grandes y medianas de nuestro país. Se ha simplificado la geometría de las parcelas utilizando sus centroides, facilitando el proceso de agregación posterior de la información en cada una de las celdas de la malla.

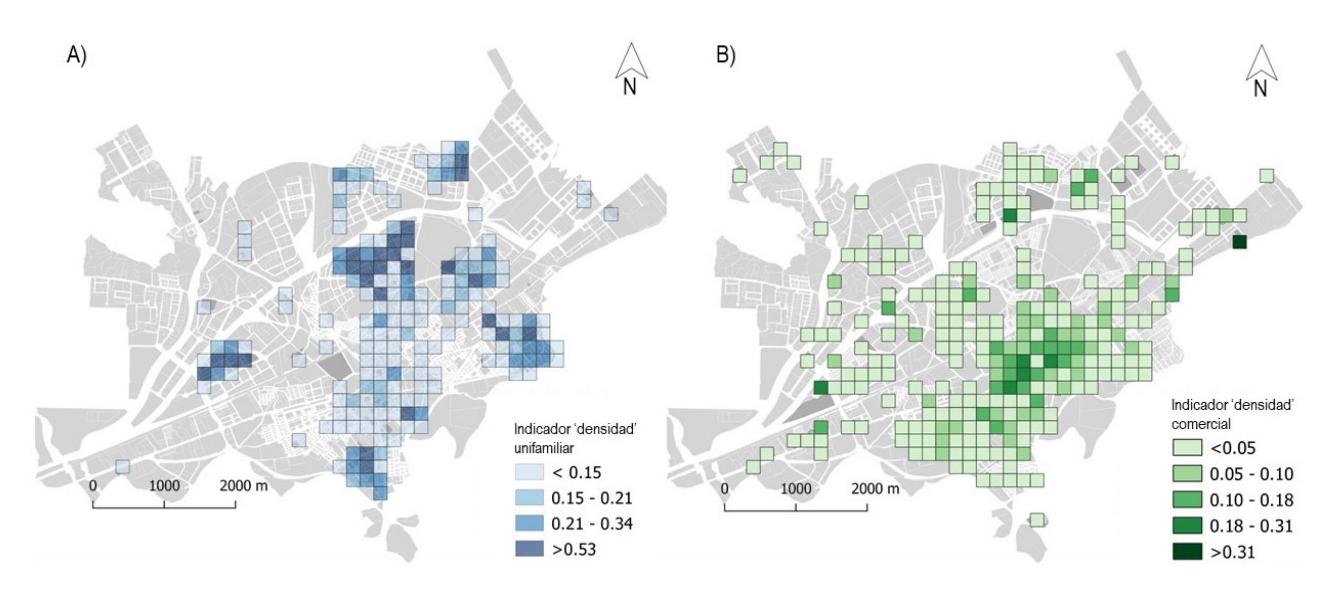


Figura 3. Indicadores de 'densidad' de ocupación según (A) tipología edificatoria 'unifamiliar' y (B) uso de suelo comercial en Alcalá de Henares (rejilla 200x200m). Fuente: elaboración propia.

En esta primera aproximación, a modo de ejemplo, se ha aplicado un indicador (adimensional) de ocupación, en la línea de los desarrollados en trabajos como los de Mora-García y Marti-Ciriquian (2015) o Agencia de Ecología Urbana de Barcelona (2011), que pretende determinar la 'densidad' de vivienda unifamiliar (Figura 3-A) y comercial (Figura 3-B), entendida como superficie edificada del uso o de la tipología edificatoria en las diferentes parcelas catastrales sobre la superficie total de cada celda.

Se puede observar que son algunos sectores de los ensanches más recientes de la ciudad los que concentran los valores más altos en el indicador. En ellos, siguiendo el modelo imperante en nuestro país durante las últimas décadas, han sido habituales las promociones inmobiliarias de agrupaciones continuas de vivienda unifamiliar (en hilera, adosada, aislada, etc.) que configura un tejido residencial de baja densidad, de parcelario muy segmentado y con escasa mezcla de usos.

En cuanto a la actividad comercial, destacan especialmente los valores elevados de densidad que se registran en el entorno del casco antiguo de la ciudad, ubicación central en la trama urbana que, además de ser localización tradicional del comercio, concentra en la actualidad una importante oferta terciaria. De igual forma, es posible identificar algunos enclaves distribuidos por la ciudad donde, tanto el predominio de tipologías edificatorias de bloque en altura con bajos destinados a uso, fundamentalmente, comercial, como la presencia de supermercados, centros comerciales, etc. elevan su carácter comercial.

3.2.2. Análisis de la diversidad y el paisaje urbano

La diversidad urbana se define como la cualidad de un espacio urbano determinado respecto a la variedad de usos o actividades presentes en el mismo, que conforma el entorno de vida de la población (Yoshimura et al., 2021). Su estudio es una tarea fundamental para comprender gran parte de los problemas existentes en las ciudades como son la segregación social, la inseguridad ciudadana, la congestión del tráfico o la contaminación del aire, ya que estos tienen una relación directa con la configuración espacial de los usos del suelo urbano (Nabil y Eldayem, 2015).

Para analizar en profundidad la diversidad urbana se requiere información detallada sobre los usos del suelo urbano para las unidades territoriales analizadas (manzana, parcela, construcción y unidad constructiva). Además, un factor decisivo a tener en cuenta a la hora de trabajar con este tipo de indicadores es la escala de análisis, ya que la diversidad o heterogeneidad espacial que conforma el paisaje urbano es altamente dependiente de la misma (Díaz-Varela et al., 2016). Así, es posible calcular el valor de diversidad para cada parcela (teniendo en cuenta el uso de las edificaciones contenidas), para cada manzana (teniendo en cuenta el uso de las parcelas contenidas), e incluso para cada sección censal.

Los resultados de CC facilitan el cálculo de indicadores como el *Índice de Entropía* (EI) o el *Índice de Diversidad de Shannon* (SHDI) para la estimación de la diversidad urbana (Yoshimura et al., 2021) o la evaluación e la mezcla de usos (Yang et al., 2021). A modo de ejemplo, la Figura 4 muestra una aproximación al estudio de la diversidad urbana en el municipio de Alcalá de Henares (Madrid). A partir de los resultados de la clasificación intermedia, y en función de la proporción de usos del suelo urbano contenidos en determinada manzana, se ha obtenido un valor de diversidad urbana mediante:

$$EI = -\left[\sum_j^k P_j \cdot \ln(P_j)\right] / \ln(k) \quad (1)$$

donde P_j es la proporción de usos del suelo urbano de tipo j en una parcela, y k es el número de usos del suelo urbano que alberga dicha parcela. Los valores oscilan entre 0 y 1, donde 0 indica un uso totalmente homogéneo del suelo (segregación), y 1 indica una distribución uniforme de todos los tipos de uso del suelo presentes en la manzana (mezcla). Se pueden observar zonas de mayor diversidad urbana (casco antiguo de la ciudad de Alcalá de Henares), así como espacios monofuncionales de baja diversidad, asociados a los nuevos crecimientos residenciales periféricos y algunos sectores industriales.

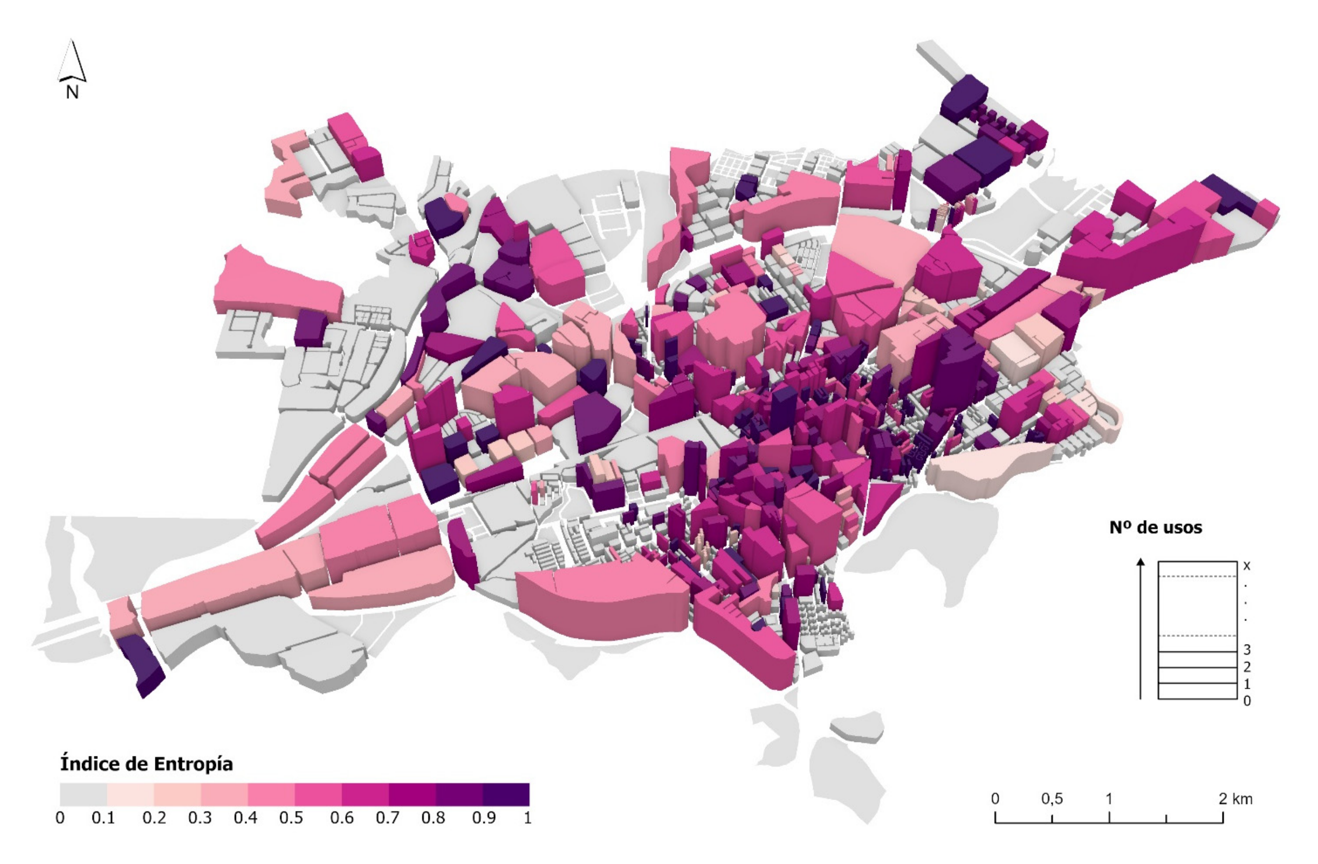


Figura 4. Representación tridimensional de la diversidad urbana en el municipio de Alcalá de Henares. Los rangos de color representan el EI y la altura de la manzana el número de usos que alberga. Fuente: elaboración propia.

3.2.3. Clasificación de las ciudades

Generar clasificaciones de las ciudades en función de sus características demográficas, tamaño, vivienda, movilidad, configuración del paisaje urbano, usos del suelo, etc. ha sido objeto de múltiples estudios (Pascual Rosa et al., 2019; Sánchez-Ondoño y Cebrián-Abellán, 2019; Schwarz, 2010).

Una distribución parcelaria detallada puede ser ensayada como variable/variables de entrada para la generación de clasificaciones de ciudades, bien en solitario, o bien combinadas con otras variables de carácter sociodemográfico, de movilidad, paisajístico, etc., en metodologías que combinen análisis factorial para reducir las variables de entrada y una posterior clasificación mediante análisis de conglomerados (Aguilera-Benavente et al., 2014; Cebrián-Abellán et al., 2021; Pascual Rosa et al., 2019).

A modo de ejemplo, se presentan los resultados preliminares de la clasificación las capitales de provincia españolas, junto con las ciudades mayores de 100.000 habitantes, usando como datos de entrada únicamente el porcentaje de cada uno de los 14 usos del suelo obtenidos en la clasificación intermedia de CC, y realizando un análisis factorial previo para reducir el número de factores empleados. La Figura 5 muestra cinco grupos de ciudades generados, y la Figura 6 su caracterización, atendiendo a tres factores resultado de un análisis factorial, como combinación de diferentes usos del suelo.

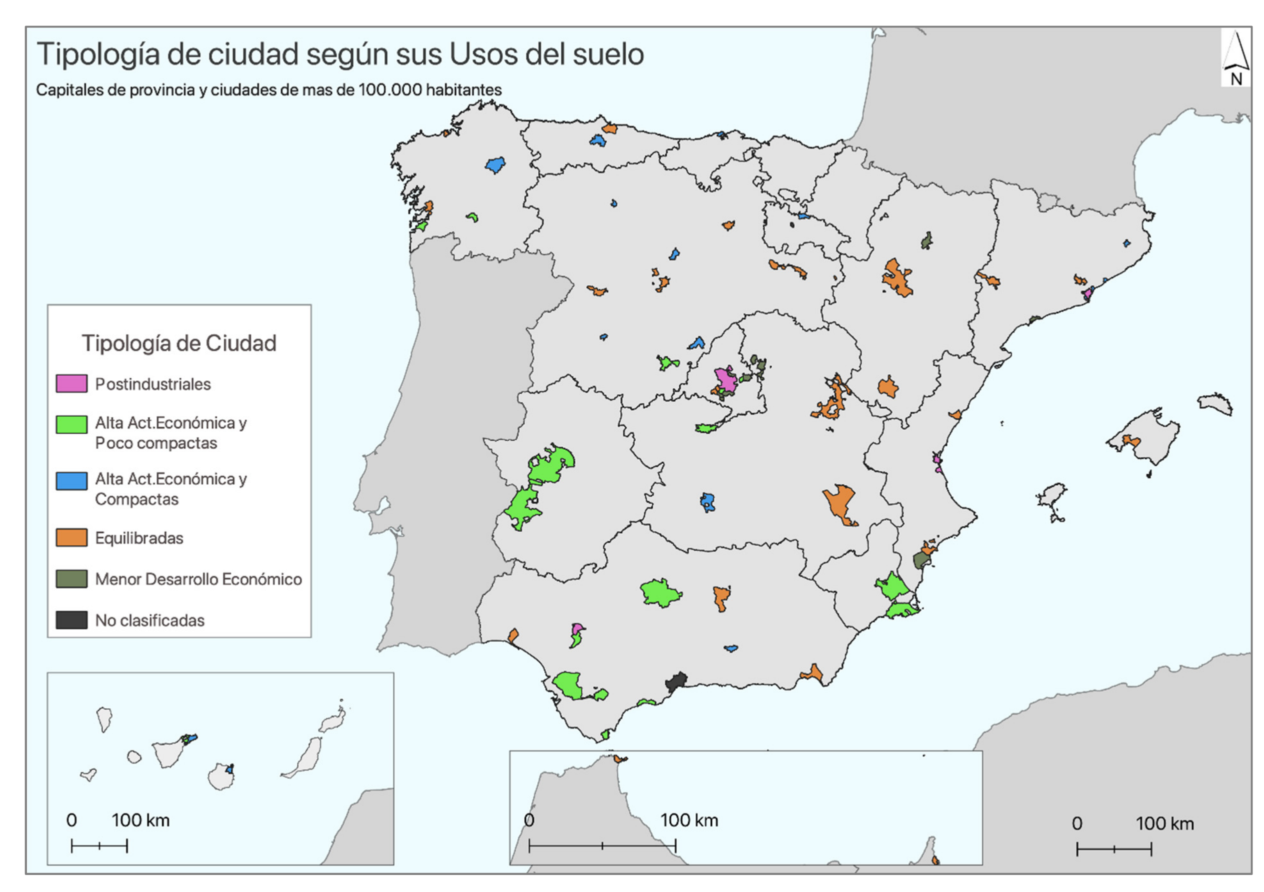


Figura 5. Ensayo de clasificación de ciudades españolas mediante la cartografía de usos urbanos generada con CC. Fuente: elaboración propia.

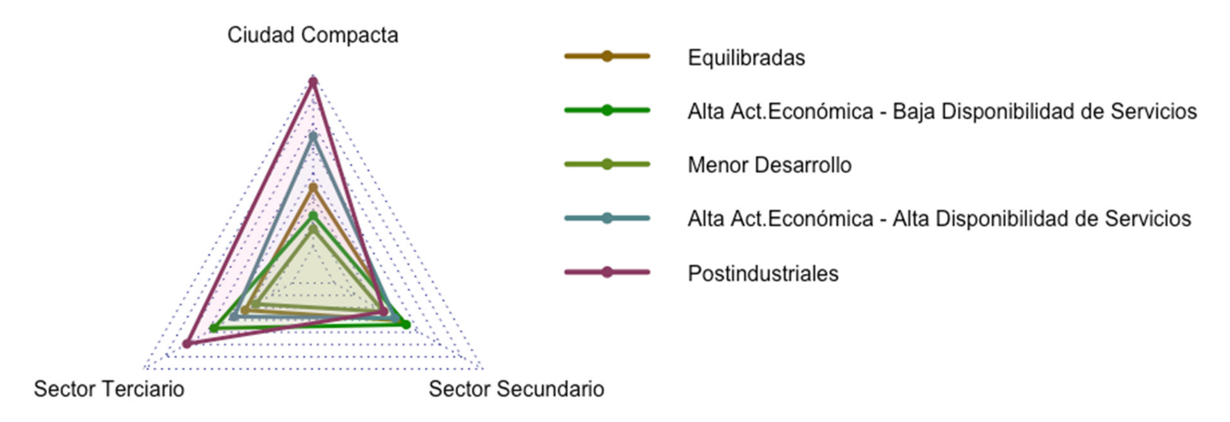


Figura 6. Caracterización de las ciudades en función de tres factores resultado del análisis factorial. Fuente: elaboración propia.

3.2.4. Instrumento de apoyo a la docencia para el uso de información catastral

Como se ha señalado anteriormente, la información catastral ha sido, y sigue siendo, un instrumento de gran valor para las Administraciones Públicas y para el sector privado (Manzano Agugliaro y Salmerón Manzano, 2006). En este sentido, la adquisición de competencias en el manejo de este tipo de información por parte de los futuros profesionales de los sectores de la planificación, el urbanismo, la ordenación del territorio, el transporte, etc. como parte de su formación universitaria de grado o máster, resulta fundamental. Sin embargo, el acceso, estructura y comprensión de dicha información presenta una gran complejidad para nuevos usuarios, dificultando el proceso de aprendizaje. En este sentido, CC puede convertirse en una herramienta de interés para la docencia, acercando el uso de la información catastral a discentes con menor grado de formación técnica en aspectos relacionados con datos espaciales.

Con este objetivo, se ha comenzado la realización de seminarios piloto de manejo y aplicación de CC en diversas titulaciones, concretamente en el máster en Tecnologías de la Información Geográfica de la Universidad de Alcalá (UAH), y el grado en Ingeniería de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), enfocados minimizar la brecha existente entre el alumnado universitario y la adquisición, descarga y tratamiento de dicha información, y que, además, han permitido realizar análisis de la funcionalidad de la herramienta en contextos docentes.

Los resultados preliminares de los cuestionarios realizados en ambos seminarios (con un total de 24 alumnos encuestados) arrojan que el 90% de los discentes consideran que CC facilita el manejo de la información catastral 'Bastante' o 'Mucho', y más del 80% consideraba que CC facilita el entendimiento del propio modelo de datos catastral. Por ello, consideramos que CC abre nuevas posibilidades en el proceso de adquisición de competencias en el manejo de la información catastral, dentro de las titulaciones más relacionadas con el análisis/gestión del territorio.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las ventajas del empleo de las clasificaciones generadas por CC en el estudio y análisis del espacio urbano están relacionada con:

- Compatibilidad. El complemento CC emplea la parcela catastral como unidad mínima de representación. Dicha unidad es de especial relevancia en tareas de gestión de los usos del suelo en el ámbito urbano, al ser la unidad de referencia en la planificación y zonificación urbanística (Barreira-González et al., 2019).
- Adaptabilidad. La generación de clasificaciones con un elevado nivel de desagregación temática favorece el desarrollo de aplicaciones que requieran leyendas muy específicas para sus análisis (tipología de comercios, tipologías residenciales, etc.). La clasificación avanzada, además, permite personalizar las categorías utilizadas en función de más de cincuenta tipologías constructivas.
- Exactitud temática. El uso de los ficheros CAT para extraer la tipología constructiva de cada una de las construcciones ofrece una elevada precisión en la clasificación de las parcelas.
- Nivel de detalle. La posibilidad de ajustar el porcentaje de superficie edificado facilita la identificación de parcelas con áreas aun por desarrollar, abriendo nuevas oportunidades a modelos de simulación del crecimiento urbano. Del mismo modo, el nivel de detalle ofrecido por las clases mixtas (residencial unifamiliar, residencial multifamiliar e industrial), ayuda a identificar y describir la estructura y funciones de la ciudad.
- Código abierto. CC ha sido desarrollado en código libre (Python), e implementado en el software libre QGIS. Ello implica una total transparencia, facilitando la ayuda de la comunidad en la mejora del complemento, así como la adaptación, por parte de usuarios avanzados, a cualquier tipo de aplicación relacionada.

Son numerosas las aplicaciones derivadas del uso y tratamiento de la información catastral disponible en la DGC, ya que, a pesar de su finalidad tributaria, la componente geoespacial de dicha información permite su integración en un SIG mediante la implementación de bases de datos espaciales y relaciones entre tablas (Martín-Jiménez y Rodriguez-Espinosa, 2022). CC simplifica el manejo de la información catastral, además de generar cartografía a nivel de parcela a partir de los datos disponibles en la DGC.

La presente comunicación muestra posibles aplicaciones derivadas de las clasificaciones generadas con CC en el ámbito de los estudios urbanos, así como sus posibilidades como instrumento docente. Estas aplicaciones no pretenden ser exhaustivas y todas son trabajos en curso del equipo desarrollador de CC. A nuestro juicio, las potencialidades de la herramienta son elevadas, ya que, además de su posibilidad de ser utilizada por cualquier usuario con competencias básicas en el manejo de SIG, también facilita la utilización de la información catastral en el análisis del espacio urbano.

En cuanto a las limitaciones presentes en la información catastral disponible y las propias a CC, se destaca la carencia de información en lo que respecta a la identificación de zonas verdes urbanas, así como la limitación de acceso a la información catastral requerida por CC, debido a la necesidad de registro para la descarga de los ficheros geoespaciales y de los registros CAT.

En lo referente a posibles implementaciones futuras, actualmente el equipo desarrollador estudia la posibilidad de ampliación de las funcionalidades en varias líneas: a) análisis multitemporales de cambios en la distribución de usos del suelo específicos, incorporando información relativa a la antigüedad de las edificaciones, b) agregación de resultados a otras unidades espaciales (secciones censales, manzanas, tramos de

calle, etc.), así como soluciones gráficas para generar mallas o rejillas de referencia para el cálculo de indicadores urbanos y c) desarrollo de nuevos módulos orientados a integrar información externa (altitud, pendiente, orientación, dotación verde, censos de población, etc.) que pudiera ser de utilidad para generar determinados indicadores de sostenibilidad. Por último, señalar que, aunque las aplicaciones recogidas en esta comunicación están enmarcadas en entornos urbanos, CC también permite trabajar con el parcelario rústico, por lo que puede ser de interés explorar posibles líneas de trabajo y aplicaciones a este respecto.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el contexto del proyecto SIM4PLAN (Desarrollo de un prototipo multiusuario de ayuda a la planificación) financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España (PDC2021-121568-C21). Así mismo, también ha contado con fondos del programa de "Estímulo hacia la Excelencia para el profesorado Universitario Permanente" (EPU-INV/2020/009) de la Comunidad de Madrid.

5. BIBLIOGRAFÍA

Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. (2011). *Sistema de indicadores y condicionantes para ciudades grandes y medianas.* Barcelona: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/pdf/3093A86A-128B-4F4D-8800-BE9A76D1D264/111504/INDI_CIU_G_Y_M_tcm7177731.pdf

Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. (2012). Guía metodológica para los sistemas de auditoría o acreditación de la ciudad y sostenibilidad en el medio urbano. En *Madrid: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento*.

Aguilera-Benavente, F., Botequilha-Leitão, A. y Díaz-Varela, E. (2014). Detecting multi-scale urban growth patterns and processes in the Algarve region (Southern Portugal). *Applied Geography*, 53, 234–245. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.019

Banister, D. (2011). Cities, mobility and climate change. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1538–1546. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.03.009

Barreira-González, P., Aguilera-Benavente, F. y Gómez-Delgado, M. (2019). Implementation and calibration of a new irregular cellular automata-based model for local urban growth simulation: The MUGICA model. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(2), 243–263. https://doi.org/10.1177/2399808317709280

Bettencourt, L. y West, G. (2010). A unified theory of urban living. *Nature*, 467(7318), 912–913. https://doi.org/10.1038/467912a

Carpio-Pinedo, J., Benito, M., Lamíquiz Daudén, P. J. y Pozueta Echavarri, J. (2018). Medir la mezcla de usos como complementariedad funcional y espacial. Los tejidos de la burbuja inmobiliaria en el Área Metropolitana de Madrid (1990-2012). *Ciudad y Formas Urbanas. Vol. 5. Formas Urbanas, Planeamiento, Proyecto Urbano*, 73–84.

Cebrián-Abellán, F., González-González, M. J. y Vallejo-Pascual, M. E. (2021). Typology of medium-sized cities in spain using pca (Principal component analysis). *Sustainability*, 13(5), 1–21. https://doi.org/10.3390/su13052456

DGC. (2022). *Sede Electrónica del Catastro*. Dirección General Del Catastro. http://www.sedecatastro.gob.es/

Díaz-Varela, E., Roces-Díaz, J. V. y Álvarez-Álvarez, P. (2016). Detection of landscape heterogeneity at multiple scales: Use of the Quadratic Entropy Index. *Landscape and Urban Planning*, 153, 149–159. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.05.004

Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X. y Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864), 756–760. https://doi.org/10.1126/science.1150195

Manzano Agugliaro, F. y Salmerón Manzano, E. (2006). El Catastro en la universidad española. *CT Catastro*. https://www.catastro.meh.es/documentos/publicaciones/ct/ct57/01-CATASTRO_57.pdf

Martín-Jiménez, J. M. y Rodriguez-Espinosa, V. M. (2022). Sistematización de la información de Catastro utilizando PostgreSQL-PostGIS. Aplicación al análisis de usos del suelo urbano en Alcalá de Henares, España. *Estudios Geográficos*, 83(292). https://doi.org/10.3989/estgeogr.2022106.106

Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. (2020). *Áreas Urbanas en España, 2019*. Gobierno de España. https://apps.fomento.gob.es/CVP/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=BAW070

Mora-García, R. T. y Marti-Ciriquian, P. (2015). Desagregación poblacional a partir de datos catastrales. *XXIV Congreso de La Asociación de Geógrafos Españoles (AGE). Análisis Espacial y Representación Geográfica, Innovación y Aplicación.*, 305–314.

Nabil, N. A. y Eldayem, G. E. A. (2015). Influence of mixed land-use on realizing the social capital. *HBRC Journal*, 11(2), 285–298. https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.03.009

Pascual Rosa, V., Aguilera-Benavente, F. y Salado García, M. J. (2019). Clasificación y análisis de los procesos de cambio en la forma urbana de las áreas metropolitanas españolas: aplicación de métricas espaciales. *Estudios Geográficos*, 80(286), e006. https://doi.org/10.3989/estgeogr.201926.006

Quílez Aznar, I. (2021). *Evaluación del modelo cronourbanista de la "Ciudad de los 15 minutos" en Zaragoza*. Universidad de Zaragoza.

Rodríguez-Espinosa, V. M. y Gómez-Delgado, M. (2008). Propuesta metodológica para la elaboración de un índice de calidad de vida urbana mediante SIG. *Serie Geográfica*, 14, 207–221. http://hdl.handle.net/10017/2085

Sánchez-Ondoño, I. y Cebrián-Abellán, F. (2019). El Catastro como fuente para analizar los procesos de dispersión urbana en ciudades intermedias: Toledo (2000-2016). *CT Catastro*, 95, 45–63.

Santos Preciado, J. M. (2015a). La cartografía catastral y su utilización en la desagregación de la población. Aplicación al análisis de la distribución espacial de la población en el municipio de Leganés (Madrid). *Estudios Geograficos*, 76(278), 309–333. https://doi.org/10.3989/estgeogr.201511

Santos Preciado, J. M. (2015b). Metodología para medir la estructura urbana de la ciudad actual, utilizando la base de datos del catastro. Aplicación al sector suroeste de la comunidad de madrid. *Boletin de La Asociacion de Geógrafos Españoles*, 67, 37–60. https://doi.org/10.21138/bage.1816

Schwarz, N. (2010). Urban form revisited-Selecting indicators for characterising European cities. *Landscape and Urban Planning*, 96(1), 29–47. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.01.007

Shurupov, N., Molinero-Parejo, R., Rodriguez-Espinosa, V. M. y Aguilera-Benavente, F. (2022). Clasificador Catastral: complemento de QGIS para la clasificación de los usos del suelo urbano a nivel de parcela. *En Revisión*.

Temelová, J., Jíchová, J., Pospíšilová, L. y Dvořáková, N. (2017). Urban Social Problems and Marginalized Populations in Postsocialist Transition Societies: Perceptions of the City Center of Prague, the Czechia. In *Urban Affairs Review* (Vol. 53, Issue 2). https://doi.org/10.1177/1078087415620304

Yang, H., Fu, M., Wang, L. y Tang, F. (2021). Mixed land use evaluation and its impact on housing prices in beijing based on multi-source big data. *Land*, 10(10). https://doi.org/10.3390/land10101103

Yoshimura, Y., Kumakoshi, Y., Milardo, S., Santi, P., Arias, J. M., Koizumi, H. y Ratti, C. (2021). Revisiting Jane Jacobs: Quantifying urban diversity. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 49(4), 1228–1244. https://doi.org/10.1177/23998083211050935



APLICACIONES Y DESARROLLOS BASADOS EN TIG (SIG, TELEDETECCIÓN, CARTOGRAFÍA Y OTRAS GEOTECNOLOGÍAS)

TIG en la docencia y en la divulgación del conocimiento geográfico



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 625-632

Aprendizaje basado en la investigación: aplicando tecnologías de la información geográfica al estudio de la segregación urbana

I. Aguado Moralejo[1]*, N. Dávila Cabanillas*[1]

[1] *Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Facultad de Letras. C. Tomás y valiente, s/n, 01006, Vitoria-Gasteiz.*

itziar.aguado@ehu.eus, nagore.davila@ehu.eus

RESUMEN: La llegada de inmigrantes extranjeros a las áreas urbanas está transformando las pautas de localización de la población autóctona modificando el paisaje social de nuestras ciudades. Tiene interés, por tanto, el estudio de la concentración de los grupos de población inmigrante y de sus pautas de localización, con objeto de identificar si existen procesos excluyentes que llevan a su segregación. Vinculándolo con el desarrollo de competencias relacionadas con el ODS11 "Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles", se presenta una práctica didáctica llevada a cabo en la asignatura de geografía urbana en la que mediante el uso del software de Geo-Segregation Analyzer, una herramienta que permite el cálculo de indicadores que permiten medir la segregación, y en combinación con el empleo de SIG para la representación cartográfica de los resultados, los estudiantes realizan un análisis de la distribución residencial de la población inmigrante. Se trata de un trabajo cuantitativo en el que, partiendo de datos de distribución de la población en función de su procedencia, se estudian las diferentes dimensiones de la segregación residencial (igualdad, concentración, exposición, agrupamiento y centralización) en dos periodos distintos con objeto de contrastar si existen procesos de segregación de estas comunidades. El objetivo de esta práctica es doble: por un lado, que el alumnado sea capaz de utilizar las técnicas de documentación, recogida de datos, análisis y metodologías propias de la geografía urbana y, por otro lado, que tome conciencia y realice una reflexión crítica en torno a las dificultades que algunos grupos de población pueden tener en su inclusión en el espacio urbano.

Palabras-clave: segregación urbana, Geo-Segregation Analyzer, población inmigrante, Sistemas de Información Geográfica.

1. INTRODUCCIÓN

Diversos autores (Martori & Apparicio, 2011; Pan Ké Shon & Verdugo, 2015) llaman la atención sobre el incremento de la segregación de la población inmigrante en Europa occidental, que a su vez puede derivar en comunidades fragmentadas e incluso procesos de guetificación que amenacen la cohesión social. Abordar un análisis de la concentración residencial de estos colectivos y su relación con una mayor o menor integración social de los mismos se presenta relevante de cara a establecer posibles intervenciones sociales que eviten la exclusión de los grupos de población más vulnerables. Esto entronca perfectamente con el ODS-11 "Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles" y, por tanto, las actividades didácticas donde se aborde este tema son muy relevantes para trabajar la sensibilización de los estudiantes con este ODS.

En Euskadi, el reciente incremento en la llegada de inmigrantes extranjeros a las ciudades y municipios vascos está originando que su localización residencial empiece a presentar unos patrones específicos diferenciales de la población nativa. Considerando que la concentración residencial de los inmigrantes puede ser el resultado de procesos de exclusión social y étnica, aunque también teniendo presente que en ciertas circunstancias es el resultado de elecciones personales y voluntarias de los propios inmigrantes, resulta relevante obtener una imagen cartográfica objetiva de la localización residencial de los inmigrantes.

Además, debemos entender que la segregación residencial es un hecho consustancial al desarrollo urbano y de ahí el interés de la geografía urbana por su estudio. Los patrones de distribución de la pobla-

ción en el espacio interior de la ciudad han sido abordados desde las primeras décadas del siglo XX por parte de esta disciplina, cuando se realizaron estudios iniciales por parte de la Escuela de Ecología Urbana de Chicago. Sin embargo, el despegue de este campo de investigación se produjo a mediados de los años cincuenta, con el desarrollo de las técnicas estadísticas y trabajos seminales como los desarrollados por Bell (1954) o el matrimonio Duncan y Duncan (1955). Se empieza entonces no sólo a estudiar los patrones de segregación sino también a preocuparse por medir los niveles de segregación y se avanzó considerablemente en la proposición de índices para su cuantificación.

No hay que olvidar que la segregación residencial se presenta como un fenómeno complejo y multidimensional, lo que hace preciso especificar el modo de cuantificarlo al inicio de cualquier análisis territorial cuyo objetivo sea identificar los patrones de segregación de la población. En esta línea, uno de los trabajos que ha contribuido en mayor medida a dar sistematización en la medición de la segregación fue el realizado por Massey y Denton (1988) y su posterior desarrollo por Massey et al. (1996), donde se propone analizar la segregación residencial en base a cinco dimensiones: igualdad, exposición, concentración, agrupamiento y centralización.

La igualdad relaciona el porcentaje que representa un grupo de población (generalmente una minoría) respecto al conjunto de la población en la escala de análisis seleccionada (por ejemplo, un barrio) relacionándolo con lo que representa dicho subgrupo en el total de la población analizada si consideramos el conjunto de las unidades de análisis (por ejemplo, la ciudad). De esta forma se puede identificar si la distribución de este subgrupo de población es homogénea o no. La exposición mide el nivel de contactos potenciales entre el grupo minoritario y el mayoritario dentro de la unidad territorial de análisis seleccionada. La exposición será mayor si se comparten más áreas residenciales comunes. La concentración hace referencia a la superficie que ocupa el grupo minoritario que se encontrará más concentrado cuanto más confinado se encuentre en un área geográficamente reducida y compacta. La centralización sería la concentración en un área central de la ciudad. Para ello habrá que definir previamente cuál es el área central de referencia. El agrupamiento hace referencia a la contigüidad de unidades territoriales que concentran altos porcentajes del subgrupo de población considerado (Massey et al., 1996).

Para cada una de estas dimensiones, se pueden distinguir diferentes tipos de índices en función de los grupos de población que comparemos: referentes a un grupo de población, si se mide exclusivamente la distribución de un grupo específico de población respecto al total de la población; referentes a dos grupos, si se compara la distribución de dos grupos de población que habitualmente suelen referirse a grupo minoritario y grupo mayoritario; e índices multigrupo, cuando se estudian la distribución de varios grupos de población a la vez.

Para el cálculo de estos indicadores, contamos con una herramienta de gran utilidad: Geo-Segregation Analyzer (Apparicio et al., 2013). Se trata de un software libre que permite el cálculo de numerosos indicadores relativos a las dimensiones consideradas y tres índices más de carácter espacial (coeficientes de localización, medida de la entropía y tipología de Poulsen), que pueden ser representados cartográficamente. Además, lo interesante de esta herramienta es que permite incorporar ficheros georreferenciados con las variables que se quieren analizar y poder decidir la escala espacial a la que se va a realizar el análisis, pudiendo identificar tanto patrones a nivel micro como macro (Lichter et al., 2020), con lo que puede tener utilidad tanto para estudios propios de la geografía urbana como de la geografía regional.

El objetivo de nuestra comunicación es presentar la utilidad de esta herramienta dentro de la práctica docente. En nuestro caso, vamos a presentar una experiencia didáctica desarrollada en el marco de la asignatura de Geografía urbana, asignatura obligatoria de tercer curso del grado de Geografía y Ordenación del Territorio de la UPV/EHU. A través de un estudio de caso, el alumnado tendrá que aplicar este software para el cálculo de diversos índices de segregación llegando a enunciar conclusiones acerca de los patrones de localización residencial de la población inmigrante en un municipio de la CAPV.

La comunicación se estructura de la siguiente manera. En la siguiente sección, se realiza una descripción de las fuentes de información y cartográficas empleadas. En la sección 3 se presenta el software utilizado y su utilidad en el estudio de la segregación residencial. En la sección 4 se presenta el diseño metodológico de la actividad, enmarcándolo en la asignatura de Geografía urbana. La sección 5 especifica la evaluación de la actividad didáctica. Por último, la sección 6 contiene el apartado de conclusiones.

2. FUENTES DE INFORMACIÓN, UNIDADES ESPACIALES DE ANÁLISIS

Para la elaboración de este trabajo son precisos dos tipos de fuentes: fuentes estadísticas y fuentes

cartográficas. La fuente estadística principal es la Estadística Municipal de Habitantes que se actualiza anualmente. De forma paralela, el estudiante podrá complementar el análisis con otras variables estadísticas que le permitan identificar las características sociodemográficas y del tejido residencial de los barrios.

A cada estudiante se le asignará un municipio de más de 20 000 habitantes. Optamos por este tipo de municipios, dado que, a partir de ese tamaño poblacional, los municipios tienen desglosado a nivel de barrio la información sobre población según su procedencia y podemos conocer la población de origen extranjero. Nuestra fuente de información estadística básica son las Estadísticas Municipales de Habitantes y la unidad territorial de análisis los barrios. Se podría alcanzar un nivel inferior de análisis, utilizando para ello los Censos de Población y Vivienda, pero no dispondríamos de datos actualizados anualmente y la interpretación de los resultados resultaría más compleja debido a la mayor dificultad de identificar las unidades censales en el espacio. Por ello, como primera aproximación nos parece adecuado la escala barrial, que posteriormente además va a permitir investigar acerca de las características del barrio al complementar con información relativa a la renta, el desarrollo urbanístico de los barrios, a las características de su tejido residencial, a sus equipamientos e infraestructuras, etc., variables que también se encuentran desglosadas a nivel de barrio en Eustat (Instituto Vasco de Estadística).

Como fuentes cartográficas se dispone de numerosas capas en formato shapefile que recogen los límites geográficos en GeoEuskadi. Los estudiantes tendrán que utilizar varias de estas capas para realizar un mapa de localización del área de estudio y será imprescindible también que empleen la capa vectorial de límites de barrios porque deben construir una nueva capa shapefile uniendo sus variables de población extranjera a la capa de barrios de su municipio. Esta será la capa shapefile que tendrán que importar al programa Geo-Segregation Analyzer. Del mismo modo, si quieren elaborar análisis complementarios tienen disponibles datos de Planeamiento Urbano en el visor geográfico de Udalplan. Junto con el tratamiento cartográfico de la información, resulta de utilidad observar las fotografías aéreas para identificar diferentes trazados urbanos, tipologías edificatorias y bordes que puedan contribuir a acentuar la segregación residencial percibida a través de los indicadores de segregación obtenidos mediante el software especializado.

De esta forma, a través de una práctica relativamente sencilla, los estudiantes pueden integrar diferentes contenidos del temario relacionados con la morfología urbana y con la percepción del paisaje urbano. Como conclusión, se le pide al alumno que contraponga sus resultados con los modelos de distribución residencial desarrollados por las teorías clásicas de la segregación residencial de forma que identifiquen si alguna de ellas se adapta a la realidad del municipio seleccionado. Por último, como actividad complementaria dentro de la asignatura se realiza una salida de campo a la villa de Bilbao siendo uno de los objetivos abordados en la misma el ver in situ distintos patrones de segregación, especialmente visitando los barrios de San Francisco, Bilbao La Vieja y Abandoibarra que presenta marcados contrastes en su tejido social y urbano.

3. GEO-SEGREGATION ANALYZER

Geo-Segregation Analyzer es un software libre que permite realizar de forma automática el cálculo de 40 índices para la medición de las distintas dimensiones de la segregación (Massey et al., 1996). Por cada dimensión, la herramienta las divide en tres clases de índices. Los índices de un grupo (19 índices), que miden la distribución de un determinado grupo de población respecto a la población total. Los índices de dos grupos (13 índices), que son los que comparan la distribución de un determinado grupo de población con la de otro grupo. El tercer tipo son los referidos a los índices multigrupo (8 índices), que analizan simultáneamente la distribución de varios grupos.

Además, tienen incorporado un visor cartográfico que permite representar el coeficiente de localización, el índice de diversidad (entropía) y la tipología de Poulsen (Apparicio et al., 2014) o directamente grabarlo en el fichero shapefile que hemos tenido que incorporar con nuestras variables de análisis para posteriormente representarlo en otro SIG (Figura 1). Al incorporar un fichero vectorial con datos desglosados para unidades territoriales de análisis, permite medir también la centralización de la segregación, pero previamente hemos de incorporar una variable binaria que indique, para cada una de las unidades territoriales de análisis si dicha unidad pertenece al área central (en cuyo caso se indica con un 1) o no pertenece al área central (en este caso, se indica con un 0).

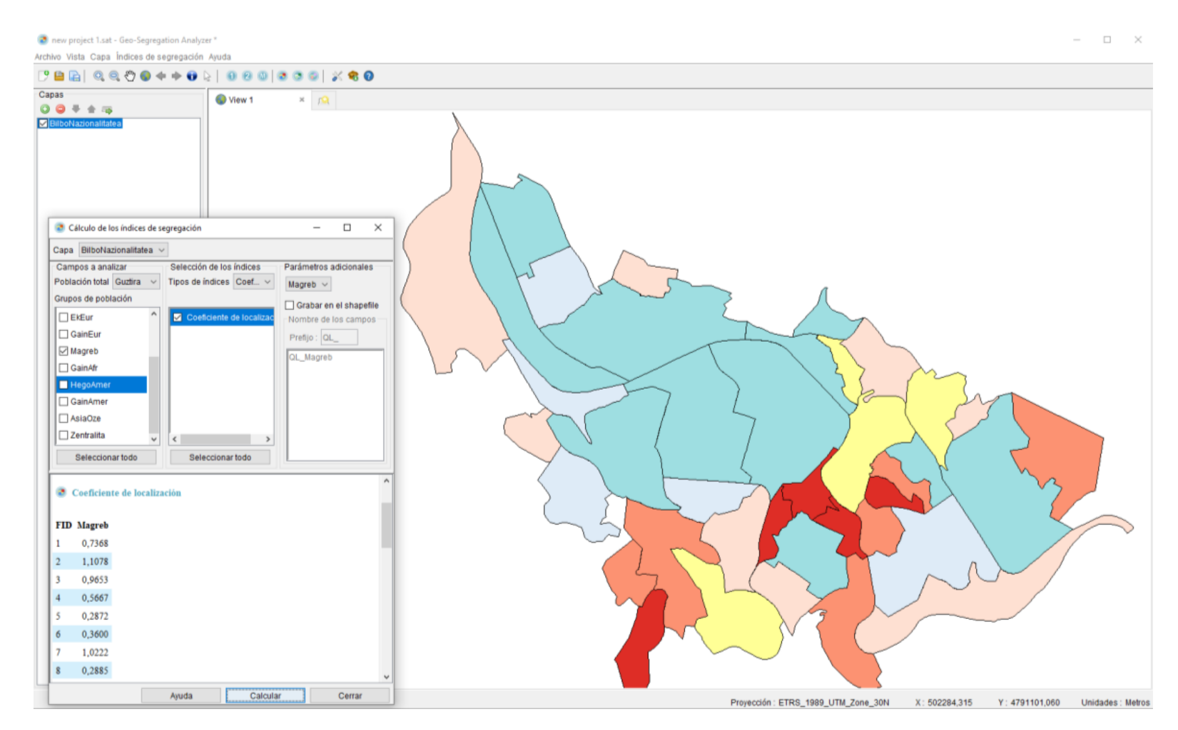


Figura 1. Interface del programa Geo-Segregation Analyzer. Fuente: Apparicio et al. (2013).

Por último, otras ventajas adicionales de esta herramienta es que permite su personalización y está disponible en varios idiomas, entre ellos el español y el catalán, y que funciona de forma autónoma y no se necesita ningún otro programa que sirva de soporte. Además, el propio programa cuenta con un menú de ayuda donde se recoge la definición de cada uno de los índices y algunas indicaciones que permiten su interpretación, así como un conjunto amplio de referencias bibliográficas relativas a la segregación residencial.

4. DISEÑO DE LA ACTIVIDAD

El objetivo de esta actividad es que el estudiante sea capaz de entender la cartografía de la segregación residencial en función del estado migratorio. Principalmente se dota al alumnado de un cuerpo de análisis basado en los indicadores clásicos de segregación. Previamente se han trabajado las teorías clásicas de la segregación socio-residencial a través de la metodología *Flipped Learning* o Clase Invertida. La Clase Invertida consiste en un modelo pedagógico que transfiere la instrucción directa del espacio grupal al espacio individual, haciendo que el contenido básico se estudie en casa y el tiempo del aula se pueda dedicar a un aprendizaje activo (Santiago & Bergmann, 2018). Entendiendo que los contenidos relativos a la interpretación de las dimensiones de la segregación y al cálculo de indicadores presentan mayor complejidad que entender las teorías clásicas de la segregación, se dedican dos sesiones de clase para explicar estos contenidos y realizar distintos cálculos mediante Excel con la intención de que los alumnos entiendan las entrañas del cálculo de los indicadores más utilizados (coeficientes de localización o índice de segregación). De forma paralela, se les introduce en el software Geo-Segregation Analyzer a través de videotutoriales cortos que explican su manejo y la interpretación general de los índices que se les solicita (Figura 2).

La práctica persigue, por un lado, que desarrollen competencias individuales de autonomía y organización personal, pero también queremos fomentar el aprendizaje colaborativo. Por este motivo, se propone que cada estudiante trabaje sobre un municipio diferente, pero se ponen en común los resultados a través de presentaciones breves en clase de forma previa a la entrega final del trabajo donde se han de incorporar las conclusiones. Los estudiantes deben proporcionar los patrones de distribución residencial de la población de origen extranjero y extraer conclusiones acerca de su integración residencial en el conjunto de la población local.

Con esta práctica, se pretende principalmente trabajar las competencias de búsqueda y tratamiento de información estadística, representación cartográfica y análisis espacial. La práctica está dirigida a obtener los resultados de aprendizaje relacionados con la asignatura de geografía urbana en los que debe demostrar que es capaz de realizar un breve trabajo de investigación y construir índices de segregación e in-

terpretar sus resultados. De esta manera se trabaja la competencia recogida en la memoria verificada de la titulación relativa a la capacidad de utilizar las técnicas de documentación, recogida de datos, análisis y metodologías propias de la geografía urbana (Figura 3).

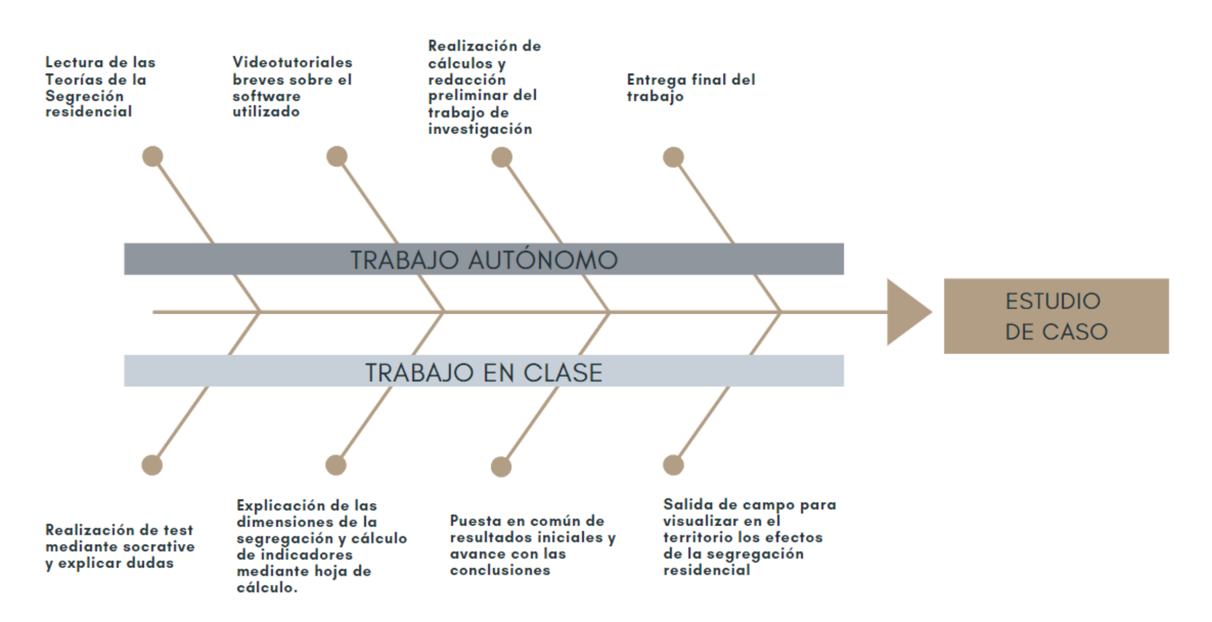


Figura 2. Secuenciación didáctica con incorporación de pedagogías de Clase invertida. Fuente: elaboración propia.

OBJETIVOS	COMPETENCIAS	RESULTADOS DE APRENDIZAJE
Analizar la segregación de los inmigrantes a nivel de barrio. Interpretar la distribución de la población inmigrante, para identificar patrones de estructura urbana.	Se pretende que el estudiante sea capaz de utilizar las técnicas de documentación, recogida de datos, análisis y metodologías propias de estas disciplinas (Competencia M03CM06 del módulo y G006 de La titulación)	El alumno construye índices para analizar la segregación social e interpreta los resultados. Identifica los patrones de segregación en el interior del espacio urbano. Desarrolla un breve trabajo de investigación demostrando que sabe estructurar los contenidos.

Figura 3. Objetivos, competencias y resultados de aprendizaje de la actividad didáctica. Fuente: elaboración propia.

5. EVALUACIÓN

Se trata de una evaluación continua que pretende que el estudiante pueda ir controlando su proceso de aprendizaje. Se solicitarán diferentes entregas (índices calculados, interpretación de los resultados y entrega final con análisis suplementarios y conclusiones) que darán pie a una retroalimentación por parte del profesorado, sugiriendo mejoras que el estudiante puede ir incorporando hasta entregar el proyecto final, que es el que finalmente se calificará para la nota final. La evaluación será mixta combinando autoevalua-

ción (en la que los alumnos deben cumplimentar un cuestionario señalando si han cumplido aspectos del formato exigido) y evaluación por parte del profesorado en base a una rúbrica de evaluación que se facilitada al alumnado previamente para que conozcan los criterios de evaluación (Tabla 2). El porcentaje que representa esta práctica sobre la nota final de la asignatura es del 30 % y con ella se pretenden trabajar también las competencias transversales de expresión escrita y trabajo autónomo. Esta práctica sirve para evaluar los contenidos específicos del Tema 4 de la asignatura titulado "La estructura social de la ciudad", pero también interrelaciona contenidos de los temas 2 (morfología), tema 3 (imagen urbana y percepción de la ciudad) y tema 5 (distribución funcional de la ciudad).

Como parte de evaluación, es muy importante el proceso de retroalimentación por parte del profesorado que permite guiar al estudiante. Con esta intención, junto con las entregas solicitadas, se da opción a los estudiantes de enviar el borrador del trabajo una vez finalizado para su corrección por parte del profesorado. Además, los estudiantes tienen a su disposición un post específico para este trabajo en un foro de tutoría virtual creado para la asignatura en la plataforma Moodle de la universidad donde pueden plantear sus dudas o ir comentando los resultados que vayan obteniendo. Esto permite que no sólo el/la profesor/a puedan solventar esas dudas, sino que haya interacción entre los propios alumnos y alumnas.

Tabla 1. Rúbrica de evaluación

FORMATO Y COMUNICACIÓN ESCRITA (30 %)				
CATEGORÍA	**PESO**	0 - 4	4 - 7	7 - 10
Claridad y corrección en el uso del lenguaje	**10%**	Nivel de expresión poco académico, expresiones demasiado coloquiales. Uso impreciso del lenguaje. Presencia de errores sintácticos y ortográficos.	Nivel de expresión correcto, aunque no académico. Claridad mejorable. Pocos errores sintácticos y ortográficos.	Utilización de lenguaje académico. Claridad y eficacia en la transmisión de ideas. Ausencia de errores sintácticos y ortográficos.
Elementos gráficos, mapas, tablas y ecuaciones	**10%**	Elementos gráficos inadecuados: mala visualización, no tienen leyenda, no aparece título, no aparece fuente. No se hace referencia adecuada en el texto.	Elementos gráficos adecuados, aunque presentan imprecisiones o el formato es poco atractivo. Se dan algunos problemas en la referenciación.	Elementos gráficos adecuados, muy visuales y con formato cuidado. Se encuentran correctamente referenciados en el texto.
Edición del documento	**10%**	No se ajusta a las normas establecidas en la guía del trabajo. Estructura inadecuada. No presenta índice paginado. Páginas sin numerar. Formato del texto e interlineado no adecuado.	Se ajusta a las normas, pero presenta algunas deficiencias de edición. Faltan algunos de los elementos exigidos en la guía del trabajo.	Se ajusta totalmente a las normas de la guía del trabajo.
CONTENIDO CONCEPTUAL (70 %)				
CATEGORÍA	**PESO**	0 - 4	4 - 7	7 - 10
Introducción y objetivos	**10%**	La introducción no plantea el tema principal ni anticipa la estructura del trabajo. No se establecen los objetivos del Trabajo. Se describen de manera insuficiente o confusa. No son coherentes con el resto de contenidos de la Memoria.	El tema se presenta, aunque no se desarrolla de forma adecuada. Se establecen los objetivos, pero su descripción es imprecisa o poco clara.	La introducción plantea el tema principal y anticipa la estructura del trabajo. Se establecen de manera clara y precisa los objetivos y/o hipótesis de investigación.
Metodología	**15%**	La metodología utilizada no es la adecuada para resolver los objetivos propuestos. Su descripción es insuficiente.	La metodología es adecuada y su descripción es aceptable aunque podría mejorarse.	La metodología es adecuada y su descripción es correcta.

Resultados	**15%**	Los resultados obtenidos no están en coherencia con la metodología utilizada, ni con los objetivos expuestos. La descripción y/o elaboración de los resultados obtenidos es confusa y/o errónea.	Los resultados obtenidos están en coherencia con la metodología utilizada y los objetivos expuestos. La descripción y/o elaboración es correcta pero mejorable.	Los resultados obtenidos están en coherencia con la metodología utilizada y los objetivos expuestos. La descripción y/o elaboración de los resultados es adecuada.
Conclusiones	**20%**	En el trabajo no se demuestran los conocimientos adquiridos a lo largo del curso. No se elaboran nociones integradoras (conclusiones de cierre, hipótesis para futuros trabajos) o su formulación es errónea, confusa o contradictoria con el resto del documento.	En el trabajo se demuestran solo algunos de los conocimientos adquiridos a lo largo del curso. Se elaboran nociones integradoras (conclusiones de cierre, hipótesis para futuros trabajos) pero su contenido es mejorable.	En el trabajo se demuestran plenamente los conocimientos adquiridos a lo largo del curso. Se elaboran nociones integradoras (conclusiones de cierre, hipótesis para futuros trabajos) de manera adecuada.
Fuentes bibliográficas	**10%**	No se han cotejado los contenidos del trabajo (antecedentes, objetivos, metodologías, resultados) con aquellos disponibles en las fuentes bibliográficas. Se han consultado fuentes inadecuadas o no actualizadas.	Se han cotejado los contenidos del trabajo aunque la bibliografía consultada no es totalmente adecuada o actual.	Se ha realizado una exhaustiva labor de consulta de la bibliografía disponible. Es adecuada y actual.

Fuente: elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

En la práctica propuesta nos hemos centrado en la cuantificación de la segregación residencial de la población de procedencia extranjera, para lo que se utilizan una serie de indicadores de segregación social de amplio uso en la geografía urbana que permiten analizar la distribución de los inmigrantes relacionándola tanto con el conjunto de la población, como con los diferentes grupos de nacionalidades. Se trata principalmente de un trabajo empírico, en el que, partiendo de datos de población desagregada a nivel de barrio, se utiliza un software específico (Geo-Segration Analyzer) para el cálculo de indicadores y su posterior interpretación en base a información documental y estadística. Esta comunicación ha pretendido ser lo más detallada posible para facilitar su replicación dado que se trata de una actividad didáctica que se ha venido desarrollando en los últimos cursos y perfeccionándola en su diseño y que ha sido positivamente valorada por los estudiantes.

En cuanto a los resultados de esta práctica, al finalizar el curso, de forma complementaria a la Encuesta de opinión del Alumnado que se realiza en todas las asignaturas, se lleva a cabo una pequeña encuesta de valoración entre el alumnado con preguntas más concretas sobre la metodología empleada. Se les cuestionó específicamente sobre su satisfacción con la metodología *Flipped learning*, algunas de las herramientas TICs empleadas (Kahoot, Socrative, etc.) y sobre si consideraban que a través de esta práctica habían adquirido los resultados de aprendizaje expuestos en la guía del estudiante. A esta cuestión todos los estudiantes han contestado afirmativamente y los comentarios aportados reflejan, por lo general, una valoración muy favorable. No obstante, debido a que el número de estudiantes matriculados a lo largo de estos últimos años ha sido bastante bajo, no se puede realizar un análisis estadístico de estas encuestas ni derivar de ella resultados generalizables. En todo caso, se puede señalar que cuatro alumnos han continuado con esta línea de investigación y han optado en cuarto curso por realizar trabajos de fin de grado en los que han empleado estas técnicas para cuantificar la segregación socio-residencial.

Además, esta práctica sirve para sensibilizar al alumnado en temas de sostenibilidad social, pretendiendo que tomen conciencia de que la sostenibilidad urbana es algo que va más allá de la dimensión ambiental y que incorpora también cuestiones sociales como la inclusión de los distintos colectivos también desde el punto de vista espacial, en tanto que la distribución desigual de las minorías en el espacio urbano

puede conllevar muchos problemas derivados como la guetificación, la degradación física del tejido urbano, incremento de violencia y criminalidad, etc. Esta concienciación sirve de base para el desarrollo de nuevas competencias y permite la adquisición de unos conocimientos que son de utilidad para otras asignaturas que se imparten posteriormente en el grado (planeamiento urbano y ordenación del territorio, especialmente). De esta forma, a través de esta práctica pedagógica, que se implementa mediante metodologías activas, se da soporte a las teorías constructivistas al permitir que el alumnado pueda construir esquemas mentales de utilidad para la adquisición de conocimientos posteriores.

7. BIBLIOGRAFÍA

Aguilar Ortiz, L. (2015). Segregación residencial y población extranjera en Lleida. En J. de la Riva, P. Ibarra, R. Montorio, y M. Rodrigues (Eds.), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación* (pp. 1901-1910). Universidad de Zaragoza-AGE. http://congresoage.unizar.es/eBook/trabajos/201_Aguilar%20Ortiz.pdf

Apparicio, P., Fournier, E. y Apparicio, D. (2013). *Geo-Segregation Analyzer: a multi-platform application (version 1.2)*. Spatial Analysis and Regional Economics Laboratory (SAREL), INRS Urbanisation Culture Société.

Apparicio, P., Martori, J. C. y Fournier, E. (2014). Geo-Segregation Analyzer: una herramienta para el análisis de la segregación residencial. En *International Conference on Regional Science,* Zaragoza, España. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2089.1043

Bell, W. (1954). A probability model for the measurement of ecological segregation. *Social Forces*, 32(4), 357-364. https://doi.org/10.2307/2574118

Duncan, O. D. y Duncan, B. (1955). Residential distribution and occupational stratification. *American Journal of Sociology*, 60(5), 493-503. https://doi.org/10.1086/221609

Lichter, D. T., Parisi, D. y Ambinakudige, S. (2020). The spatial integration of immigrants in Europe: A cross-national study. *Population Research and Policy Review*, 39(3), 465-491. https://doi.org/10.1007/s11113-019-09540-3

Martori, J. C. y Apparicio, P. (2011). Changes in spatial patterns of the immigrant population of a southern European metropolis: the case of the Barcelona metropolitan area (2001–2008). *Tijdschrift voor economische en sociale geografie*, 102(5), 562-581. https://doi.org/10.1111/j.1467-9663.2011.00658.x

Martori, J. C. y Hoberg, K. (2004). Indicadores cuantitativos de segregación residencial. El caso de la población inmigrante en Barcelona. *Geo Crítica / Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, 8(169). http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-169.htm

Massey, D. S. y Denton, N. A. (1988). The dimensions of residential segregation. *Social forces*, 67(2), 281-315. https://doi.org/10.1093/sf/67.2.281

Massey, D. S., White, M. J. y Phua, V. C. (1996). The dimensions of segregation revisited. *Sociological methods & research*, 25(2), 172-206. https://doi.org/10.1177/0049124196025002002

Pan Ké Shon, J.-L. y Verdugo, G. (2015). Forty years of immigrant segregation in France, 1968–2007. How different is the new immigration? *Urban Studies*, *52*(5), 823–840. https://doi.org/10.1177/0042098014529343

Santiago, R. y Bergmann, J. (2018). *Aprender al revés. Flipped learning 3.0 y metodologías activas en el aula* (2ª ed.). Paidós Educación.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 633-642

La educación para la sostenibilidad desde las aulas universitarias empleando los Sistemas de Información Geográfica en la nube

M.L. de Lázaro-Torres[1], M.A. Puertas-Águilar[2], J. Álvarez-Otero[3]

[1] Dpto. de Geografía, Universidad Nacional de Educación a Distancia. Paseo de la Senda del Rey 7, 28.040 Madrid.
[2] Escuela Internacional de Doctorado de la UNED (EIDUNED), Universidad Nacional de Educación a Distancia. Bravo Murillo 38, 28.015 Madrid.
[3] Facultad de Educación, Universidad Nacional de Educación a Distancia. Juan del Rosal 14, 28.040 Madrid.

mllazaro@geo.uned.es, mpuertas48@alumno.uned.es, j.alvarez.otero@madrid.uned.es

RESUMEN: Educar para la sostenibilidad es un reto que las emergencias eco-sociales han impulsado. Para abundar en la sostenibilidad se han creado situaciones de aprendizaje o estudios de caso siguiendo los Principios de Rosenshine y empleando como herramienta principal los Sistemas de Información Geográfica en la nube o SIG Web, que permiten la visualización de evidencias relacionadas con los problemas de sostenibilidad, lo que más allá del conocimiento teórico de las metas e indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, invita a una acción transformadora sustentada en el pensamiento crítico. La evaluación de este proceso se ha realizado empleando la revisión de pares ciegos con la herramienta de la Universidad de Glasgow, Aropä, y un cuestionario final al que respondieron voluntariamente un 30,36 y un 37,93 % del total de estudiantes en formación de la UNED y futuros profesores de Geografía e Historia en los cursos académicos (2020-2021 y 2021-2022). Los docentes y futuros docentes que se han acercado a los materiales aportados, y además han elaborado otros nuevos, experimentan el potencial de la cartografía en la nube y de los mapas web o SIG Web para aprender sobre el territorio y sus problemas de sostenibilidad de una forma razonada, por lo que han valorado muy positivamente las actividades realizadas. La satisfacción mostrada es mayor en los estudiantes que elaboraron una situación de aprendizaje empleando SIG Web que en aquellos que elaboraron una unidad didáctica de forma tradicional. Se implementa de esta forma la sostenibilización curricular desde la universidad en la formación del profesorado de secundaria.

Palabras-clave: información geográfica, SIG Web, sostenibilización curricular, Objetivos de Desarrollo Sostenible.

1. INTRODUCCIÓN

El vertiginoso crecimiento de la información geográfica en abierto ha impulsado el empleo de los Sistemas de Información Geográfica en la nube o SIG Web, no sólo en investigación y transferencia, sino también en la educación geográfica. Las aulas de formación del profesorado de Enseñanza Secundaria y los centros escolares han tomado un liderazgo con esta herramienta por su usabilidad y la facilidad de acceso, al ser ofrecida la plataforma de ArcGIS Online (ESRI) gratuitamente a los centros educativos no universitarios. De este modo, queda respondida la cuestión de si la tecnología tiene o no cabida en las aulas docentes, para centrarse en que el docente aborde su integración en el plan de estudios desde la formación inicial del profesorado que se ofrece en la universidad. Así, la educación pasa a emplear estas herramientas en el mismo plano en el que ya se hallaban otras muchas actividades socioeconómicas, científicas y culturales.

Existe un consenso en el hecho de que las SIG Web facilitan la comprensión de la realidad territorial y sus atributos físicos y socioeconómicos a través de la visualización de esos datos entre la mayoría de los profesores que las integran en la formación del profesorado que se imparte desde universidad y en la enseñanza secundaria (Álvarez-Otero, 2020; Buzo, 2021; Buzo-Sánchez et al., 2022; Fargher, 2018; Puertas et al., 2022; Zwartjes y De Lázaro, 2019, entre otros), así como en otras materias, en la enseñanza del turismo (Mínguez, 2021; Martínez-Hernández et al, 2021), en el paisaje (De Lázaro et al., 2017), en la arqueología (Pons et al, 2019) o el trabajo de campo (Phantuwongraj et al., 2021), entre otras. Todos ellos reflexionan sobre las pedagogías más adecuadas para su implantación, si bien el método indagatorio y el aprendizaje basado en problemas aparecen como las más empleadas (Álvarez-Otero y De Lázaro 2018; Digan, 2019;

Kerski, 2011; Sebastián y De Miguel, 2017). Sin embargo, en el Reino Unido están muy extendidos los principios de Rosenshine (2012) reforzados por el análisis de Sherrington (2019), por lo que se ha visto adecuado buscar un modelo docente en esta línea. Estos principios se basan por un lado en la investigación de la ciencia cognitiva, en cómo el cerebro adquiere y utiliza la información, en la observación de la práctica en el aula de profesores expertos cuyos estudiantes tienen un gran éxito en el aprendizaje y en métodos de instrucción basados en apoyos y andamiaje cognitivo para el aprendizaje, a lo que ayudarán las preguntas de comprensión. Se irán introduciendo poco a poco en tareas cada vez más complejas, por lo que se recomienda que las actividades experienciales se utilicen después de haber aprendido los conocimientos básicos. De este modo, se evidencia lo que el estudiante va aprendiendo.

En este marco, y en el contexto de la sostenibilización curricular defendida por la profesora Murga y su equipo, que la definen como un proceso de incorporación de criterios y valores de la sostenibilidad en la enseñanza y el aprendizaje del alumnado, de modo que la sostenibilidad impregne todas las esferas de la docencia (Murga-Menoyo y Bautista-Cerro, 2019), es decir, educar para el desarrollo sostenible.

El objetivo principal ha sido integrar los objetivos de desarrollo sostenible para la educación en sostenibilidad desde la universidad a través del empleo de situaciones de aprendizaje o estudios de caso que integren distintas modalidades de cartografía interactiva conteniendo geoinformación relevante al tema en cuestión, con la finalidad de dotar a los futuros profesores de un conocimiento profundo de las herramientas tecnológicas que se emplean hoy en geografía y mostrar su utilidad para aprender, enseñar y para sostenibilizar el *currículum*. Estas situaciones de aprendizaje están orientadas temáticamente como narraciones en tercera persona entrelazadas con preguntas de comprensión, en las que el alumno participa en la comprobación de hipótesis y en la resolución de problemas en primera persona. La modelización acompaña a la evaluación formativa mostrando cómo hacer, pueden incluir simulaciones y predicciones apoyadas en el conocimiento adquirido. Se integran la perspectiva del profesor y del alumno (Chaloupka y Koppi, 1998) y son una forma de evaluar la motivación, realizar modelos y pruebas de resolución de problemas y desarrollar el pensamiento crítico (Bearman et al., 2016; Jeffries y Maeder, 2005).

Se va a comenzar por abordar las dificultades en educar para la sostenibilidad desde las aulas universitarias, para abundar en los Principios de Rosenshine (2012), y cómo se ha implementado este modelo de sostenibilización curricular en la UNED en la asignatura de Complementos para la Formación Disciplinar en Geografía del Máster Universitario en Formación del Profesorado de Educación Secundaria Obligatoria y Bachillerato, Formación Profesional y Enseñanzas de Idiomas, a través del conocimiento y creación de situaciones de aprendizaje o estudios de caso. Para terminar con una valoración de los resultados obtenidos a través de los trabajos elaborados y las respuestas a los cuestionarios.

2. EDUCAR PARA LA SOSTENIBILIDAD DESDE LAS AULAS UNIVERSITARIAS

Educar para la sostenibilidad no es simplemente un "añadido" a los planes de estudio existentes y a su forma de concretarlos en las aulas, sino que implica un cambio basado en la capacidad de responder a la crisis actual, aprovechar las oportunidades y los aspectos afectivos en la práctica docente, y en un pensamiento global (Bautista-Cerro et al., 2019). Esto influye directamente en el aprendizaje de los alumnos, que pueden cambiar actitudes y mejorar la eficacia de la enseñanza, con un dominio afectivo de las emociones por parte del profesorado con relación al contenido que se enseña (Puertas et al., 2021).

Así, el valor educativo de la Geografía para diseñar y desarrollar contenidos de aprendizaje que faciliten la comprensión del mundo actual y de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) es importante y exige al estudiante promover competencias como el análisis crítico; la reflexión sistémica, por ejemplo, en las interrelaciones entre territorio, paisaje y sociedad, en el mundo real y en el virtual; la responsabilidad hacia las generaciones futuras para intervenir en la construcción de un futuro sostenible y facilitar los componentes básicos de formación ciudadana y de la vida en sociedad; y la capacidad para tomar decisiones reflexivas, con conocimiento y de forma colaborativa (Murga-Menoyo, 2015). De este modo, la educación para los ODS debe garantizar que la totalidad del alumnado adquiera los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para promover el desarrollo sostenible y adoptar estilos de vida sostenibles, con una educación que tenga el foco de atención en la formación integral de la persona, entendida como un ser miembro de la comunidad de vida que constituye la biosfera; a la vez eco-dependiente y con responsabilidad moral sobre la vida en el planeta (Murga-Menoyo, 2020).

En este sentido, son un factor clave las políticas públicas para integrar la Educación en Desarrollo Sostenible (EDS) en todos los contextos de aprendizaje formal, no formal e informal. La LOMLOE parece una vía de cambio en los sistemas educativos no universitarios, y por tanto en la formación del profesorado. Pero

también es esencial integrarlos en los estándares de calidad nacionales para alcanzar los resultados de aprendizaje propuestos y que en las universidades exista una voluntad política de trabajar en esta dirección. Así, la integración de la Educación para el Desarrollo Sostenible (EDS) en las competencias, los estándares profesionales, la certificación y la acreditación de docentes e instituciones de formación docente impulsaría que estos a su vez se implementaran en las aulas. Los enfoques pedagógicos adecuados deben estar centrados en los alumnos, se orientan hacia la acción y son transformadores. Por lo tanto, es vital no solo incluir contenidos relacionados con los ODS en los planes de estudio, sino también utilizar una pedagogía transformadora orientada a la acción (Murga-Menoyo, 2021; Rieckmann, Mindt y Gardiner, 2017) (Tabla 1)

Tabla 1. Educar para la sostenibilidad empleando SIG Web. Basado en Puertas et al. (2021), Abbott (2001), Favier (2013) y Sterling (2004)

Enfoque docente (Aspecto clave)	*Profundizar (Mejorar lo que existe)*	*Aplicar (Hacer mejores cosas)*	*Investigar y transformar (Hacer las cosas de otra manera)*
Sostenibilidad	Educar acerca de la sostenibilidad (teoría)	Educar empleando conceptos relacionados con la sostenibilidad (teoría)	Educar para la sostenibilidad en acciones transformadoras (teoría y práctica)
SIG Web	Enseñar y aprender acerca de las SIG Web	Enseñar y aprender empleando las SIG Web	Investigar y visualizar en SIG Web para comprender y transformar
Responsabilidad/ compromiso (radica en)	Profesor	Profesor	Profesor / estudiante

3. LOS PRINCIPIOS DE ROSENSHINE SE ADECÚAN A LA INTEGRACIÓN DE LAS SIG WEB Y LOS ODS EN LA EDUCACIÓN PARA LA SOSTENIBILIDAD

Los diez Principios de Instrucción de Rosenshine (2012) se muestran adecuados a la integración de los ODS y la geoinformación en la docencia empleando las SIG Web, evitando la sobrecarga de trabajo en el estudiante, introduciendo los contenidos poco a poco, y comprobando que el estudiante va aprendiendo (competencia de aprender a aprender). Se pueden reformular de la forma siguiente (Sherrington, 2019):

A. Instrucción directa (explicar)

1. Revisión (diaria), en la que es importante detectar las ideas previas, de forma que se repita y recupere el aprendizaje anterior (conceptos clave), ya que la repetición regular refuerza lo aprendido y conduce a un recuerdo más espontáneo. Esto será la base para el aprendizaje actual, y se puede realizar planteando preguntas o cuestiones.
2. Nuevos materiales en pequeños pasos, en que se presentarán los materiales a emplear en el aprendizaje poco a poco, desde lo más básico a lo más complejo. En este sentido, las SIG Web responden muy bien a satisfacer esta necesidad, por ejemplo, con la activación y ocultamiento de capas para reducir la sobrecarga del "mapa web"; el conocimiento procedimental requiere muchos pasos pequeños. El profesor facilita el inicio de la construcción del esquema.
3. Es esencial formular buenas preguntas, que hagan pensar al estudiante para responderlas y desarrolle el espíritu crítico. La revisión se realiza con preguntas. ¿Qué datos son necesarios? El profesor deberá acompañar a los estudiantes durante toda su práctica y ofrecer permanentemente retroalimentación para evitar las ideas erróneas. Es esencial conectar el nuevo material de aprendizaje con los conocimientos previos y su práctica.

B. Modelizar

4. Proporcionar modelos (modelización). Los alumnos pueden centrarse en los pasos para resolver un problema. Cuando se enseñan las destrezas procedimentales del SIG, el modelado es esencial y los alumnos necesitan ver cómo hacerlo bien y el efecto de ejemplo trabajado, se ofrece así apoyo cognitivo para resolver problemas más difíciles basados en tareas anteriores y ayudarlos a ser independientes, con un cambio de rol: los estudiantes preguntan al profesorado.

C. Explorar

5. Guiar la práctica del estudiante. Los mejores profesores dedican mucho tiempo a supervisar la prác-

tica/aprendizaje de sus estudiantes con el nuevo material. De este modo, se aseguran de que se mantiene la confianza y se reducen al mínimo los errores y las concepciones erróneas, que son elementos esenciales en la práctica docente. Se ofrecen materiales para que el estudiante se enfrente a la información. El uso de la retroalimentación; las preguntas fértiles, y el seguir las fases siguientes: Yo hago, nosotros hacemos, tú haces. El "yo hago" obliga a seguir una serie de pasos realizados por el profesor que explica cómo realizar el proceso. A continuación, “nosotros hacemos”, el profesor ayuda a sus alumnos proporcionándoles apoyo o andamiaje, como indicaciones o procedimientos parcialmente completados. En la última etapa “tú haces”, los alumnos realizan el procedimiento o demuestran su comprensión por sí mismos. Es esencial estimular la memoria a largo plazo a través de las tareas y ensayos.

D. Contrastar

6. Comprobar constantemente la comprensión del estudiante que emplea el material aportado para minimizar los errores. El control sistemático del aprendizaje tiene el objetivo de garantizar que ese aprendizaje de los alumnos sea preciso, para que no se arraiguen los conceptos erróneos. Es especialmente importante comprobar los esquemas o mapas mentales adquiridos. Se contrastan los resultados obtenidos con los demás estudiantes.
7. Obtener una alta tasa de éxito / resultados. Aspirar a que los alumnos experimenten aproximadamente un 80% de éxito en los ejercicios, cuestionamientos... y que no sea demasiado fácil (95-100% de éxito), de forma que el reto sea suficiente para una dificultad deseable.
8. Andamiaje o apoyo temporal del profesor (directrices, por ejemplo) para las tareas difíciles, que disminuye a medida que los alumnos son más competentes y adquieren confianza en sus resultados. Un ejemplo paralelo de la vida real, pueden ser los ruedines de las bicicletas. Se trata de proporcionar apoyo instructivo, herramientas, listas de verificación para ayudar a los estudiantes a organizar los materiales estableciendo criterios y/o estándares de calidad. Proporcionar modelos de resolución de tareas para que los estudiantes puedan comparar su trabajo.

E. Resolver problemas con la exploración individual

9. Práctica independiente. Proporcionar tiempo de práctica dentro y fuera del aula para poder automatizar el material aprendido. Los alumnos deben realizar mucha práctica deliberada hasta que su aprendizaje se consolide, de modo que alcancen la "automaticidad" y el "dominio". Se propone una actividad que consista en la resolución de un problema, para que el estudiante establezca los pasos para ello, orientado por el profesor.

F. Revisar

10. Revisión (semanal y mensual). Los alumnos necesitan practicar intensamente para automatizar el material. Para interrumpir el olvido es necesario la recuperación del aprendizaje, incluyendo el medio y el largo plazo, para vincular el aprendizaje previamente adquirido con el aprendizaje actual. Evaluación y puesta en común de los resultados. Será la fase en la que los alumnos pueden sentirse lo suficientemente seguros como para iniciar su propia exploración e iniciar de nuevo el ciclo o repasar alguno de sus aspectos.

Todas estas ideas se han resumido en el esquema de la figura 1, en la que se expresa que esos principios no son lineales, sino que es posible pasar de uno a otro, e incluso repetir el mismo en función de las necesidades del contexto, lo que queda expresado con las flechas verdes de la parte inferior de la figura.

4. LA SOSTENIBILIZACIÓN CURRICULAR: UN EJEMPLO EN EL AULA UNIVERSITARIA

En este marco, se solicitó a los estudiantes un trabajo que constaba de dos partes diferenciadas. En la primera parte, sería necesario elaborar el diseño y realización de una situación de aprendizaje acorde con una plantilla que se les proporcionó en el campus virtual, en la que se orientaba de forma concreta sobre su realización siguiendo los pasos del modelo docente citado, ayudado de la explicación en un vídeo presentando en qué consiste el trabajo. Este trabajo lo suben en la plataforma de Aropä, en un plazo claramente definido. Y en la segunda parte se realiza la evaluación por pares ciegos de las situaciones de aprendizaje elaboradas.

Se clarifica que una situación de aprendizaje no es un libro de texto con los contenidos conceptuales a impartir, sino una justificación del diseño de las actividades con los objetivos que se persiguen, los conceptos, procedimientos y actitudes a trabajar de forma integrada, y la evaluación que favorecen el aprendizaje y la adquisición de competencias. La legislación actual de la LOMLOE, que entra en vigor el 19/01/2021, y sus

desarrollos posteriores, aconseja aprender a programar por competencias. Se considerarán los planteamientos metodológicos del aprendizaje significativo y la metodología activa a alcanzar con las técnicas que el estudiante considere más adecuadas en cada caso. El estudiante diseñará con todo detalle una situación de aprendizaje que al menos contenga un prototipo de cada tipo de actividad propia de la ciencia geográfica, para observar y reflexionar, para localizar, para definir, para relacionar, para elaborar o comentar gráficos, para descubrir causas, para comentar textos e imágenes y para saber más. En ellas se deberán aportar los recursos didácticos a emplear (mapas, gráficos, textos, imágenes…) e integrar claramente elementos y evidencias para educar en los ODS, es decir para impulsar un cambio de actitudes con relación a los presupuestos de la sostenibilidad. Se formularán brevemente los elementos transversales o transdisciplinares (complementariedad con otras materias en objetivos y competencias) y las medidas de atención a la diversidad. Se deberá especificar el tiempo que los alumnos y el profesor dedicarían a cada una de las actividades diseñadas en minutos, sabiendo que cada sesión suele ser de 50’. El tema geográfico a diseñar y su enfoque es de libre elección por el alumno dentro del currículum vigente en su comunidad autónoma y será definido por un título adecuado, sin olvidar los principios del aprendizaje significativo. Se integrarán elementos relacionados con algún ODS relacionado con el tema elegido (contenidos, metas y retos), contemplando así el educar para los ODS de manera transversal (competencias a adquirir). Es importante señalar como se evalúan las competencias en sostenibilidad que se adquieran.

En la segunda parte del trabajo, ya desde la plataforma Aropä, que se ha demostrado muy adecuada para profundizar en temas de evaluación (Coronado-Marín et al., 2018, 2019, 2020 y 2022; De Lázaro et al, 2022), se propone la corrección de tres situaciones de aprendizaje o estudios de caso realizadas por otros estudiantes y asignadas por la misma aplicación, para posteriormente reflejar la evaluación de cada uno de ellos en la plataforma. Esta corrección será una parte de la calificación final. Todos los estudiantes corregirán temas diferentes al suyo, ya que la subida del trabajo a la plataforma se realizará empleando distintas etiquetas, que estarán, como su nombre indica dedicadas a distintos aspectos de la geografía: GeoFísica, GPoblación, Ciudades, Economía y Otros. Únicamente en la convocatoria de septiembre no habrá etiquetas, ya que el número inferior de trabajos impediría su distribución. De este modo, el alumnado podrá trabajar con varios temas diferentes. La elegida por uno mismo, que trabajará con mayor profundidad, y las de sus compañeros. Los detalles de cómo programar todos estos aspectos en la herramienta están recogidos en el vídeo elaborado *Aropä, evaluar por pares ciegos en línea. Una solución gratuita creada por la Universidad de Glasgow* (De Lázaro, 2021).

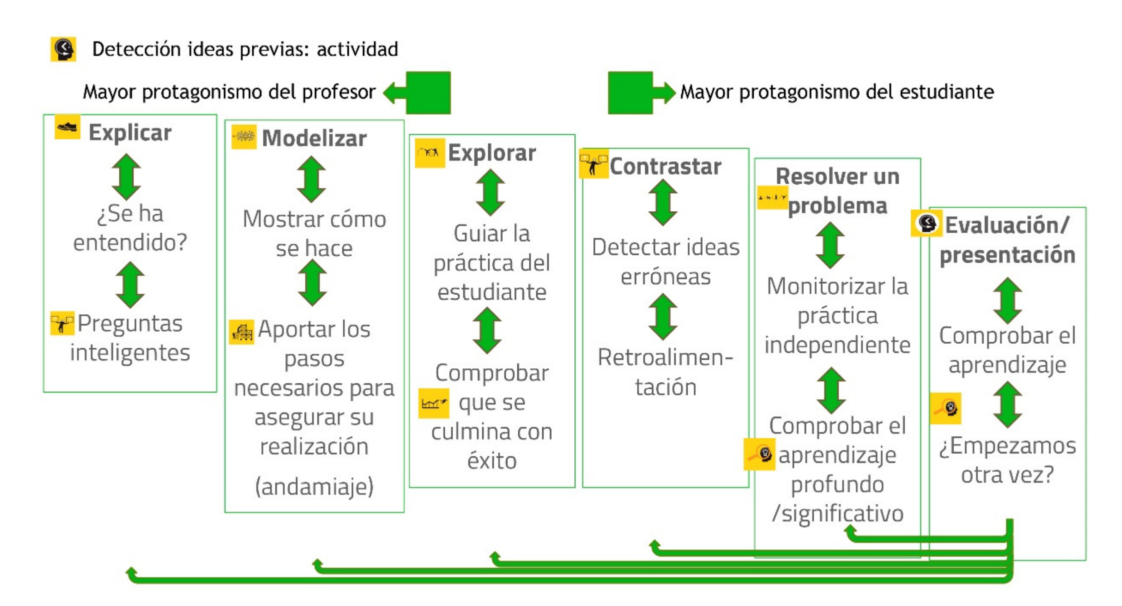


Figura 1. Adaptación de los Principios de Rosenshine (2012) a un modelo docente.

4.1. Criterios de evaluación: rúbrica empleada

El asegurar una cierta homogeneidad en la corrección es posible si el profesor facilita previamente una serie de indicadores con el formato de rúbrica, que en este caso han sido:

1.Adecuación del título elegido. Es un paraguas del contenido y responde al *currículum* oficial vigente.

2.Aporta la información clave sobre el desarrollo y la puesta en marcha de la situación de aprendizaje y

emplea al menos tres de los distintos sistemas de evaluación (autoevaluación, coevaluación, evaluación cruzada, evaluación externa y evaluación supervisada por el profesor…).

3.Contiene actividades con el detalle necesario (Actualización de los datos. Variedad y calidad de los recursos empleados).

4.Coherencia explicativa del discurso, claridad de ideas y argumentación (se entiende bien). Se centra en el aprendizaje del alumnado (contiene elementos del aprendizaje significativo).

5.Aplica correctamente los conceptos aprendidos en la asignatura. Los conceptos clave explicados son claros y están correctamente definidos. (Rigor científico en los conceptos manejados, en las citas de las fuentes empleadas, en la adaptación a la legislación vigente…)

6.Impulsa el pensamiento crítico. Sugiere nuevos interrogantes y reflexiones que abra puentes a debates posteriores.

7.Saca partido de las geotecnologías, especialmente de los SIG en la nube, con fines de aprendizaje (grado de innovación).

8.Son correctos el contenido, la ortografía y las expresiones gramaticales.

9.Con relación a los contenidos en ODS: ¿Ha realizado alguna referencia sobre cómo educar para los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) aportando los pasos concretos para alcanzar alguna de las competencias en sostenibilidad? ¿Se han conseguido las siguientes competencias: a) El análisis crítico; b) Una reflexión sistémica; c) La responsabilidad hacia las generaciones futuras; d) Capacidad para tomar decisiones de forma colaborativa? ¿Se han propuesto actividades para evaluar el progreso en el aprendizaje en los ODS? Se aconseja ver el documento siguiente para un mejor conocimiento de los ODS y sus indicadores de medición (UN, 2022).

10. Cumple las normas del trabajo solicitado en la plantilla y emplea los principios de Rosenshine. (Guión correctamente adaptado al esquema propuesto y a las normas, cita normalizada de la bibliografía siguiendo las últimas normas APA)

11. ¿Has disfrutado con la lectura del proyecto / ensayo?

Además, cada trabajo deberá aportar la propia autoevaluación con la puntuación obtenida en la misma. Y en la corrección se indicará si esta no está.

Se aportarán otras observaciones que deberán resumir brevemente las fortalezas y debilidades del trabajo evaluado y una valoración general que incluirá el cómo se ha integrado la educación en sostenibilidad para contribuir a la consecución de los ODS. Con datos claros y objetivos sobre el trabajo analizado.

De este modo la situación de aprendizaje o estudio de caso creado recibirá la evaluación desde varios ángulos, la evaluación externa del equipo docente, la evaluación recibida por los compañeros –pares ciegos- (coevaluación en la herramienta Aropä) y la autoevaluación emitida por el propio estudiante.

Además, se les ofrece unas consideraciones de obligado cumplimiento para la revisión/ corrección de los trabajos de sus compañeros que van a evaluar:

- Colaborar en la mejora del texto y no en su descalificación.
- Justificar argumentativamente la calificación. No se trata de juzgar, sino de aportar sugerencias de mejora. Los adjetivos descalificadores serán contabilizados y se penalizará su empleo.
- Detectar errores de contenidos, de ortografía, de expresión y de gramática.
- Considerar que no hay verdades absolutas, y que todo tiene un contexto temporal y espacial.
- Observar el planteamiento innovador de la experiencia / herramienta, y si es posible educar para los Objetivos de Desarrollo Sostenible a partir de la situación de aprendizaje que se evalúa.
- Detectar los puntos fuertes y los puntos débiles de la situación de aprendizaje y cómo se ha integrado la educación en sostenibilidad en ella con la finalidad de contribuir a la consecución de los ODS.

Los alumnos saben que de no entregar a tiempo su trabajo, no es posible seguir el proceso de evaluación por pares, y tendrían que hacerlo en septiembre. Se solicita responder un breve cuestionario de valoración a la finalización de la actividad, que responden en torno a un tercio de los presentados a la asignatura.

Con estos trabajos los estudiantes demostrarán que han aprendido a:

- Enseñar los contenidos propios del currículum de Geografía integrando elementos de innovación educativa.
- Educar para los ODS, colaborando en la sostenibilización del *currículum*.

- Tomar contacto con distintos recursos de interés para la enseñanza de la geografía, y evaluar las reflexiones sobre los mismos realizadas por otros estudiantes de forma anónima con la herramienta Aropä.
- Incrementar el aprendizaje en el alumnado.
- Evaluar contenidos geográficos con variados instrumentos que midan los resultados de aprendizaje.

4.2. Resultados obtenidos

Los resultados se han medido comparando las calificaciones obtenidas en las actas con las evaluaciones realizadas por los propios compañeros (Tabla 2), así como con el cuestionario respondido a final de curso Tabla 3).

Tabla 2. Resultados académicos en la asignatura de Complementos para la Formación Disciplinar en Geografía

Curso académico	*Alumnos presentados (matriculados)*	*Nota media febrero. Acta (presentados)*	*Desv. Típica calificación junio*	*Nota media septiembre. Acta (presentados)*	*Desv. Típica calificación sept.*	*Autoevaluación*	*Calificación entre iguales Aropä*	*Desv. Típica calificaciones*	*Discrepancia entre iguales sobre 10 (media)*	*Trabajo realizado en Aropä integrando los ODS*
2020-2021	56 (64)	8,02 (51)	1,47	9,12 (5)	0,57	-	7,98	1,61	1,25	Unidad didáctica tradicional
2021-2022	58* (75)	8,74 (58)	0,90	-	-	7,48	8,84	0,88	1,33	Situación de aprendizaje

* La cifra no incluye los presentados en septiembre

Tabla 3. Respuestas cuestionario sobre satisfacción con el método de trabajo en Aropä (escala de 1 a 5, Likert). Asignatura Complementos para la Formación Disciplinar en Geografía

Curso (n)	*Indicadores*	*El ver las unidades didácticas de otros estudiantes ha sido útil para mi propio aprendizaje*	*La retroalimentación proporcionada en mi propio trabajo ha sido útil*	*La revisión me ha aportado una mejor comprensión de cómo estoy progresando en este curso*	*Me ha servido para mejorar mi capacidad de reflexionar sobre mi propio aprendizaje y habilidades*	*Las revisiones realizadas me han servido para mejorar mi análisis y mis habilidades críticas*	*Ha mejorado mi aprendizaje sobre la evaluación por rúbricas*	*Estoy de acuerdo con la calificación recibida*	*En general, la experiencia de la revisión por pares ha sido útil*
2020-2021 (17)	Media aritmética	4,35	4,06	4	4,06	4,12	3,71	3,88	4,12
	Moda	4	4	4	4	4	4	4	4
	Desviación Típica	0,49	0,75	0,79	0,83	0,60	0,77	0,78	0,60
2021-2022 (22)	Media aritmética	4,5	4,64	3,84	4,76	4,88	4,07	4,76	4,25
	Moda	5	5	5	5	5	4	5	5
	Desviación Típica	0,73	0,5	1,12	0,44	0,33	0,60	0,44	0,87

La calificación reflejada por el profesor en el acta final está ponderada por la media de la calidad de las evaluaciones realizadas a sus compañeros. En general, los estudiantes se califican entre ellos ligeramente por

encima de cómo califica el profesor, con una diferencia muy pequeña, y un máximo que algunos autores, como los creadores de la plataforma, establecen en un más o menos dos puntos (Hamer et al., 2015). Sin embargo, los resultados de la evaluación por pares o la del profesorado son muy superiores a la autoevaluación realizada por cada uno de los estudiantes. La mayoría de los estudiantes encuentran útil elaborar una situación de aprendizaje o estudio de caso al iniciar el máster y consideran que este modelo docente aporta eficiencia en el aprendizaje de la geografía. Consideran una mejora en su competencia para evaluar por rúbricas. Sin embargo, después de la corrección de las 58 situaciones de aprendizaje elaboradas por los alumnos en junio 2022, podemos afirmar que se ha notado un incremento en competencias geográficas con relación al curso anterior, pero la integración de los ODS en la mayoría de los casos ha sido nominal, no se integran competencias propias de los ODS, como el pensamiento crítico, y tampoco se aportan indicadores de logro. Por lo que podemos decir, con relación a la tabla 1, que las situaciones de aprendizaje se han quedado en los primeros estadios de integrar los ODS, sin impulsar acciones transformadoras.

La observación directa en las aulas de formación del profesorado y la discusión constante de cada resultado obtenido por el grupo de investigación que impulsa esta línea de trabajo, han validado el modelo de enseñanza creado, ya que se han obtenido resultados de evaluación superiores al curso anterior, en el que el trabajo de curso consistió en una unidad didáctica convencional.

5. CONCLUSIONES

Esta forma de trabajar con situaciones de aprendizaje o estudios de caso se ha mostrado útil en la formación del profesorado para aprender geografía, integrar los ODS en la docencia, y para que los futuros profesores desarrollen estrategias docentes para constatar el aprendizaje llevado a cabo por el alumno. Además, permite un uso eficiente de las SIG Web y de otras formas de visualizar la geoinformación, como los mapas digitales interactivos. Así, los profesores en formación que se han acercado a estos materiales y han elaborado otros nuevos, han experimentado el potencial de la cartografía en la nube y de los mapas web o SIG Web para aprender sobre el territorio y sus problemas de sostenibilidad de una forma razonada, por lo que han valorado muy positivamente las actividades realizadas.

Se integran así la educación para la sostenibilidad empleando cartografía interactiva y los SIG Web, permitiendo observar las tendencias e interrelaciones en la realidad a través de las capas de los mapas que las representan. Con este conocimiento se pretende invitar a una acción transformadora sustentada por el pensamiento crítico, más allá del conocimiento teórico de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Puertas et al., 2021), que no se ha conseguido alcanzar en todos los casos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se enmarca en el proyecto «La alfabetización ecosocial: un elemento central en los procesos de sostenibilización curricular para el logro de la Agenda 2030 (ODS) en la formación inicial del profesorado (PRAD-ODS)». RTI2018-095746-B-I00, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. IP: M.ª Ángeles Murga-Menoyo. Enriquecido por el proyecto GI-Pedagogy, Innovative Pedagogies for Teaching with Geoinformation (2019-1-UK01-KA203-061576).

6. BIBLIOGRAFÍA

Abbott, T. D. (2001). *An Evaluation of Geographic Information System Software and its Utility in Promoting the Use of Integrated Process Skills in Secondary Students*. [Tesis doctoral, University of Connecticut]. https://opencommons.uconn.edu/dissertations/AAI3034002

Álvarez-Otero, J. y de Lázaro y Torres, M.L. (2018). Education in Sustainable Development Goals Using the Spatial Data Infrastructures and the TPACK Model. *Education Science, 8*(4), 171. https://doi.org/10.3390/educsci8040171

Álvarez-Otero, J. (2020). *El uso educativo de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) para mejorar la responsabilidad social de los ciudadanos del siglo XXI sobre el territorio*. [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. https://eprints.ucm.es/id/eprint/64592/1/T42185.pdf

Bautista-Cerro Ruiz, M. J., Murga-Menoyo, M. Á. y Novo, M. Á. (2019). La Educación Ambiental en el S. XXI. (página en construcción, disculpen las molestias). *Revista de Educación Ambiental y Sostenibilidad, 1*(1), 1103. https://doi.org/10.25267/Rev_educ_ambient_sostenibilidad.2019.v1.i1.1103

Bearman, N., Jones, N., André, I., Cachinho, H. A. y DeMers, M. (2016). The future role of GIS education in creating critical spatial thinkers. *Journal of Geography in Higher education,* 40(3), 394-408. https://doi.org/10.1080/03098265.2016.1144729

Buzo, I.J. (2021). *Aprendizaje inteligente y pensamiento espacial en Geografía*. [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. https://eprints.ucm.es/id/eprint/70029/1/T43019.pdf

Buzo-Sánchez, I.J., Mínguez, C. & De Lázaro-Torres, M.L. (2022). Expert perspectives on GIS use in Spanish geographic education. *International Journal of Digital Earth,* 15(1), 1205-1219. https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2096131

Chaloupka, M. y Koppi, T. (1998). A vignette model for distributed teaching and learning. *Research in Learning Technology, 6*(1), 41-49. https://doi.org/10.1080/0968776980060107

Coronado-Marín, A., y Murga-Menoyo, M. A. (2018). Una propuesta metodológica en contextos digitales: el uso sinérgico de la 'evaluación por pares' y la 'autoevaluación' para la formación de competencias en sostenibilidad. *6th International Congress of Educational Sciences and Development*. 21-23 de junio, Setúbal (Portugal)

Coronado-Marín, A., y Murga-Menoyo, M. A (2019). La evaluación como estrategia para la formación de competencias en sostenibilidad. Una práctica docente innovadora en contextos digitales. En *X Jornadas de Investigación en Innovación Docente en la UNED. Innovación educativa en la era digital*. 28 y 29 de noviembre, UNED. Madrid.

Coronado-Marín A., Bautista-Cerro M.J. y Murga-Menoyo M.A. (2020). Students and University Teachers Facing the Curricular Change for Sustainability. Reporting in Sustainability Literacy and Teaching Methodologies at UNED. En Leal Filho W., Borges de Brito P., Frankenberger F. (eds) *International Business, Trade and Institutional Sustainability. World Sustainability Series*. Springer, Cham https://doi.org/10.1007/978-3-030-26759-9_60

Coronado-Marín, A. y Murga-Menoyo, M. A. (2022). Self-assessment in the training of competences for sustainability: virtual learning environments in Higher Education. *11th World Environmental Education Congress (WEEC)*, 14-18 marzo. Prague Czech Republic.

De Lázaro, M.L, Coronado, A., y Murga, M.A. (2022). Enseñanza personalizada y activa en contextos virtuales: posibilidades de la plataforma Aropä. *XII Jornadas de Investigación en Innovación de la UNED*. https://canal.uned.es/video/6283612e6f3c002a0742a7c2?track_id=628374656f3c002d0506cb52

De Lázaro Torres, M. L., De Miguel González, R. y Morales Yago, F. J. (2017). WebGIS and geospatial technologies for landscape education on personalized learning contexts. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 6*(11), 350. https://doi.org/10.3390/ijgi6110350

De Lázaro Torres, M.L. (2021). Aropä, evaluar por pares ciegos en línea. Una solución gratuita creada por la Universidad de Glasgow. [Archivo de vídeo]. YouTube https://youtu.be/ZCZzpWPsH0M

Digan, S. (2019). Integrating GIS in experiential fieldwork. *Geographical Education* (*Online) 32,* 26-29. https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/ielapa.882183728570404.

Fargher, M. (2018). WebGIS for Geography Education: Towards a GeoCapabilities Approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 7*(3), 111. https://doi.org/10.3390/ijgi703011.

Favier, T. (2013). *Geo-informatietechnologie in het voortgezet aardrijkskundeonderwijs: Een brochure voor docenten.* [Tesis doctoral, Vrije Universiteit Amsterdam]. http://www.edugis.nl/lesmodules/Portaal/assets/Geo-informatietechnologie%20in%20het%20voortgezet%20onderwijs.pdf

Hamer, J., Purchase, H., Luxton-Reilly, A. y Denny, P. (2015). A comparison of peer and tutor feedback. *Assessment & Evaluation in Higher Education,* 40(1), 151-164. https://doi.org/10.1080/02602938.2014.893418

Jeffries, C. y Maeder, D. W. (2005). Using vignettes to build and assess teacher understanding of instructional strategies. *Professional Educator,* 27, 17-28. https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ728478.pdf

Kerski, J. J. (2011). Sleepwalking into the Future – The Case for Spatial Analysis Throughout Education. En Jekel, T, Koller, A., Donert, K. and R. Vogler. (Eds.) *Learning with GI 2011* (pp.2-11). Herbert Wichmann Verlag, VDE VERLAG GMBH, Berlin/Offenbach.

LOMLOE Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, por la que se modifica la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación (BOE 30/12/2020).

Martínez-Hernández, C., Yubero, C., Ferreiro-Calzada, E. y Mendoza-de Miguel, S. (2021). Didactic use of GIS and Street View for Tourism Degree students: understanding commercial gentrification in large urban destinations. *Investigaciones Geográficas,* 75, 61-85. https://doi.org/10.14198/INGEO2020.MYFM

Mínguez García, C. (2021). Teaching tourism: urban routes design using GIS Story Map. *Investigaciones Geográficas,* 75, 25-42. https://doi.org/10.14198/INGEO2020.M

Murga-Menoyo, M. Á. (2015). Competencias para el desarrollo sostenible: las capacidades, actitudes y valores meta de la educación en el marco de la Agenda global post-2015. *Foro de Educación,* 13(19). http://www.redalyc.org/html/4475/447544537005/

Murga-Menoyo, M. Á. y Bautista-Cerro, M. J. (2019). *Guía PRADO. Sostenibilizar el currículo de la Educación Secundaria*. UNED. https://doi.org/10.5944/catedra.eads.501120

Murga-Menoyo, M. Á. (2020). El camino hacia los ODS: conformar una ciudadanía planetaria mediante la educación. *Comillas Journal of International Relations,* 191, 1-11.

Murga-Menoyo, M. Á. (2021). La educación en el Antropoceno. Posibilismo versus utopía. Teoría De La Educación. *Revista Interuniversitaria,* 33(2), 107–128. https://doi.org/10.14201/teri.25375

Phantuwongraj, S., Chenrai, P. y T. Assawincharoenkij. (2021). Pilot study using ArcGIS Online to enhance students' learning experience in fieldwork. *Geosciences*, 11(9): 357. https://doi.org/10.3390/geosciences11090357

Pons, J.J., Armendariz, J. y Andreu, J. (2019). El *story-map* como herramienta didáctica y divulgativa en el ámbito de la Arqueología. En C. Ortega, M.ª Á. López-González, and P. Amor, (eds.). *X Jornadas de Investigación en Innovación Docente: innovación educativa en la era digital* (pp. 311-316). UNED. http://arcg.is/0frOXW

Puertas-Aguilar, M.Á., Álvarez-Otero, J. y de Lázaro-Torres, M.L. (2021). The Challenge of Teacher Training in the 2030 Agenda Framework Using Geotechnologies. *Education Sciences,* 11(8), 381. http://dx.doi.org/10.3390/educsci11080381

Puertas-Aguilar, M.Á., Conway, B., de Lázaro-Torres, M.L., De Miguel González, R., Donert, K., Lindner-Fally, M., Parkinson, A., Prodan, D., Wilson, S. y Zwartjes, L. (2022). A teaching model to raise awareness of sustainability using geoinformation. [Un modelo docente para sensibilizar sobre la sostenibilidad empleando la geoinformación]. *Espacio, Tiempo y Forma. Serie VI. Geografía*, 15, 23 - 42. https://doi.org/10.5944/etfvi.15.2022.33687

Rieckmann, M., Mindt, L., y Gardiner, S. (2017). *Educación para los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Objetivos de aprendizaje*. UNESCO.

Rosenshine, B. (2012) Principles of Instruction Research-Based Strategies That All Teachers Should Know. *American Educator,* 36(1), 12–39. https://www.aft.org/sites/default/files/periodicals/Rosenshine.pdf

Sebastián López, M. y De Miguel González, R. (2017). Geographical education 2020: Iberpix and Collector for ARCGIS as teaching resources for spatial learning. *Didáctica Geográfica,* 18, 313-316. https://didacticageografica.age-geografia.es/index.php/didacticageografica/article/view/402

Sherrington, T. (2019). *Rosenshine's Principles in Action*. John Catt Educational, Limited.

Sterling, S. (2004). Higher Education, Sustainability and the Role of Systemic Learning. En *Higher Education and the Challenge of Sustainability: Problematics, Promise and Practice*; (pp. 49–70). Springer. https://doi.org/10.1007/0-306-48515-X_5

UN. (2022). Marco de indicadores mundiales para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y metas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. https://unstats.un.org/sdgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework%20after%202022%20refinement_Spa.pdf

Zwartjes, L. y De Lázaro, M.L. (2019). Geospatial Thinking Learning Lines in Secondary Education: The GI Learner Project. En *Geospatial Technologies in Geography Education*. (pp. 41-61). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17783-6_3



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 643-651

Geo4space: una propuesta didáctica para el uso eficiente y colaborativo de las geotecnologías

L. García Juan[1], A. Alberto Villavicencio[2], J. I. Sánchez Gutiérrez[3]

[1] Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid. C/ Francisco Tomás y Valiente, 1.-28049 Madrid.
[2] Centro de Estudios de Geografía Humana, El Colegio de Michoacán A.C. Cerro de Nahuatzen 85 Fracc. Jardines del Cerro Grande, 59370 La Piedad, Michoacán, México.
[3] Departamento de Económicas, Universidad Autónoma de Madrid. C/ Francisco Tomás y Valiente, 1.-28049 Madrid.

laura.garciaj@uam.es, angeles.alberto@colmich.edu.mx

RESUMEN: El título de este congreso, las TIG al servicio de los ODS resume muy bien la situación actual y la tendencia seguida por la sociedad. Un mundo donde las TIG están teniendo un papel protagonista de tal calado que algunos autores han acuñado el término de sociedad de la geoinformación. La democratización de herramientas hasta no hace mucho destinadas a profesionales del campo de la geografía, o la expansión de los GPS ha llevado a que, a través de la red como la gran autopista de la comunicación, a diario se generen y compartan volúmenes cada vez mayores de geodatos. Todo este marco conduce al surgimiento de nuevos desafíos en relación con la formación, tanto de profesionales como de usuarios avanzados, que sean capaces de responder a las demandas existentes. Es en este punto donde a través de esta comunicación mostramos las claves y un ejemplo de cómo poder establecer nuevos planes didácticos. Desde Geo4space planteamos la necesidad de una formación transversal y participativa, donde el protagonismo tiene que estar enfocado a la enseñanza basada en competencias, sobre todo centradas en el análisis y la planificación de proyectos TIG. Para ejemplificar esta filosofía presentamos los resultados de un taller realizado de forma simultánea en la Universidad Autónoma de Madrid (presencial) y en varios puntos de Latinoamérica (online). Como hilo conductor y temática central, se eligió, por las implicaciones y demandas actuales, el análisis de la movilidad interna de los campus universitarios, desde la perspectiva de la geografía de la percepción y haciendo uso del software libre.

Palabras-clave: geoinformación, Geo4space, didáctica en TIG, geografía de la percepción.

1. LAS GEOTECNOLOGÍAS Y SU CALADO EN LA SOCIEDAD: NUEVAS NECESIDADES Y UN MUNDO EN CAMBIO

La propuesta formativa que presentamos se asienta en una necesidad de introducir nuevos métodos y técnicas en la enseñanza en el campo de las geotecnologías. Las razones vienen derivadas por la combinación de los profundos cambios sufridos por herramientas tradicionales como los SIG; las nuevas demandas sociales y los retos a los que se debe dar respuesta partiendo de información geográfica, y, finalmente, por los nuevos entornos de trabajo surgidos y que provocan también transformaciones en cuanto a las competencias que deben adquirir los profesionales (De Miguel, 2013).

Comenzando por unos breves apuntes sobre avance tecnológico al que estamos asistiendo en las últimas décadas, este sin duda un hecho que genera grandes transformaciones en todas las esferas de nuestra vida. La geografía con sus herramientas, software y metodologías no es ajena a este panorama. Por el contrario, este interés por la tecnología se vincula con otro orientado a lo espacial y que está adquiriendo un notable interés. Desde los primeros sistemas de información geográfica nacidos con unas limitaciones muy claras en cuanto a su potencial uso, pero también en relación con las personas que tenían acceso a ellos, se ha transitado a pasos gigantescos a otro concepto, el de las geotecnologías (Moreno, 2015). Un cambio que ha llevado paralelamente una democratización en el acceso cada vez más cercano y asequible, potenciado por la combinación de hardware cada vez más potentes. Esta aparente facilidad enmascara un mundo complejo, donde en ocasiones se presta atención al uso, pero no a la necesidad de llevar a cabo análisis previos, fundamentados en un proyecto con objetivos y un enfoque teórico-metodológico definido, que permitan explotar al máximo todo el rendimiento que pueden ofrecer. Y es aquí donde se sitúa la comunicación que

presentamos, mediante la cual se plantea una propuesta didáctica que trata de ser transversal y que se centra no solo en el manejo del software sino en el diseño e implementación de proyectos basados en información geográfica a través del uso combinado de distintas geotecnologías.

Otra cuestión clave en este proceso de cambio que estamos describiendo viene dada por la red y los cambios que ha introducido en la comunicación. Dentro de nuestro mundo globalizado asistimos a una transformación en las modalidades de relacionarnos. Interactuamos en la distancia para todo tipo de actividades de la vida diaria, en las de carácter profesional y para trámites ante instituciones oficiales. Se puede decir que se actúa dicotómicamente entre la realidad y virtualidad, para esta última se utiliza cada vez un mayor número de plataformas y aplicaciones, que nos conectan con múltiples ámbitos y para distintas funcionalidades.

Pero todo este mundo paralelo que se establece en la nube genera también una gran cantidad de geodatos que como veremos a continuación deben ser gestionados correctamente para evitar convertirse en un problema y por el contrario constituirse en un gran recurso que permita avanzar en la construcción de una sociedad más sostenible.

Finalmente, la red, también ha introducido como gran aporte la posibilidad de trabajar en comunidades participativas que de forma cooperativa y desinteresada trabajan con un fin común. De estos movimientos han surgido importantes proyectos relacionados con el campo de las geotecnologías como puede ser el caso de OSGEO (https://www.osgeo.org/).

Centrándonos en el campo de la didáctica, esta vía de comunicación abierta y participativa, debe estar presente, con independencia de si desarrollamos planes educativos presenciales o en modalidad online. Y es que, la situación descrita lleva aparejado un necesario cambio en el qué enseñamos, el cómo lo hacemos y para qué. Estas cuestiones están siendo objeto de especial atención tanto desde las ramas más especializadas y cercanas a la pedagogía, como de forma individualizada por cada una de las distintas disciplinas científicas, que están trabajando de forma intensa en estos campos (Buzo, 2014). En este marco, la geografía y sus especialistas también han destinado parte de sus esfuerzos a introducir nuevas metodologías más cercanas al nuevo marco social y con el objetivo de contribuir a la formación de ciudadanos más sostenibles (De Miguel, 2021).

De esta forma, en el qué enseñamos, debemos tener presente la necesidad de conjugar una formación básica, más tradicional, con otras cuestiones más dinámicas que reflejen la continua, rápida y profunda transformación tecnológica a la que asistimos a diario (Martínez at al, 2014). Y los retos que enfrentaran los futuros profesionales para atender las problemáticas espaciales contemporáneas. El espacio europeo de educación superior (EEES) introdujo un importante cambio al incorporar la necesidad de centrarse en las competencias como una vía de mejorar la empleabilidad y la competitividad (Rodríguez, 2009). Es aquí donde la enseñanza en el campo de las geotecnologías cuenta con más retos y novedades debido a que debe ser concebida como un proceso transversal y pragmático. En este sentido, una enseñanza activa en la geografía, para Marrón (2011, p. 328) referenciado por De Miguel (2013:20) favorece un aprendizaje completo: saber, saber hacer y saber ser, y propicia la explicación multicausal de hechos y fenómenos. Para este autor, la metodología activa tiene el carácter de ser potenciadora del aprendizaje significativo, autónomo y por descubrimiento, basada en la motivación del alumno.

2. UN EJEMPLO DE PROPUESTA FORMATIVA

Siguiendo los principios y planteamientos descritos anteriormente el trabajo que presentamos tiene como objetivo principal documentar las experiencias resultantes de la iniciativa Geo4space. Este grupo inició sus primeras actividades en el año 2021, con la misión de constituirse como un punto de encuentro orientado al aprendizaje y desarrollo de proyectos asentados en el uso geotecnologías de libre uso para una sociedad inclusiva, abierta y colaborativa, bajo la premisa de unir mundos e intercambiar experiencias en el espacio iberoamericano. Al mismo tiempo, persigue también la transferencia de conocimientos de la academia a otros sectores, como son los gubernamentales y organismos de colaboración al desarrollo social y urbano (Figura 1).

2.1. Análisis DAFO previo

A través de un análisis bibliográfico, entrevistas con especialistas del sector tanto dentro como fuera de la universidad y la propia experiencia de los autores, se promovió el diseño y puesta en marcha de un primer taller realizado con participantes de diversas instituciones y que desarrollamos a continuación. Sobre toda esta información previa se llevó a cabo un análisis DAFO para determinar el contenido, metodología y

herramientas del mismo. De forma previa a esta primera experiencia se llevaron a cabo diversos acercamientos tanto a las metodologías como a las herramientas propuestas. Para ello, se tomó como marco los cursos de sistemas de información geográfica del grado de Geografía de la UAM y en el curso de Gestión y gobernanza territorial: métodos y técnicas del programa de maestría en geografía humana de El Centro de Estudios de Geografía Humana, El Colegio de Michoacán A.C.



Figura 1. Plataforma Geo4space.

Como conclusiones principales se determinó que los grandes retos que tiene la enseñanza en el campo de las geotecnologías se vinculan con la transversalidad y la colaboración con otras especialidades. En el momento actual, la enseñanza de estas herramientas no es un campo que pertenezca en exclusiva a la geografía, ya que él se acercan profesionales de diversas ramas. Además, cualquier proyecto basado en geotecnologías también requiere, dada su complejidad, de su desarrollo por parte de equipos interdisciplinares. Conjugando estos rasgos junto con el gran apoyo tecnológico, nos hallamos ante una de sus grandes fortalezas, ser capaz de dar respuesta a los grandes problemas del siglo XXI y a retos como la consecución de los objetivos fijados en la agenda 2030. Para ello, debemos ser capaces de formar a profesionales con competencias muy amplias, que se puedan enfrentar a los nuevos entornos de trabajo, donde la nube tiene un papel protagonista. Aquí es importante aprender también a diseñar e implementar proyectos en los que la información geográfica tenga una especial relevancia. Estas cuestiones, aunque sean identificado como una de las demandas más inmediatas, en ocasiones son complejas de incorporar en los planes de estudio, siendo constituyendo en muchos casos un vacío dentro de los planes de estudio. Ahora bien, pese al reto de cómo introducirlas no se debe dudar en relación con la necesidad de incluirlas. Sin este conocimiento no se puede desarrollar todo el potencial que encierran las geotecnologías ni tampoco se llega a cubrir con éxito las demandas existentes.

2.2. Geografía de la percepción, la movilidad sostenible y software libre

Bajo el gran objetivo de abordar nuevas propuestas didácticas con geotecnologías, para dar el salto a una propuesta docente concreta, y combinando las cuestiones planteadas anteriormente, se diseñó una oferta formativa en la que se tenían en cuenta y se combinaban todos los aspectos descritos anteriormente. Dada la gran amplitud de los objetivos emanados del análisis DAFO era necesario acotarlo a unos límites que hicieran factible su desarrollo en el seno de un curso de corta duración. En este sentido, y dado el papel que tiene en la sociedad actual, como gran temática se tomó la cuestión de la movilidad, más concretamente en los campus universitarios (Lucas et al, 2015). Esta temática en relación con el crecimiento de grandes urbes y las concentraciones de población se convierte en uno de los grandes retos de la sociedad actual. De esta forma, son numerosos los proyectos que tratan de buscar soluciones y paliar los problemas derivados de los actuales modelos. En este contexto los campus universitarios son un espacio no diferente a una urbe, aunque también cuenta con unas particularidades propias. Esta movilidad se puede analizar tanto de forma externa como interna. En esta experiencia didáctica nos centraremos en este segundo caso, analizando desde la percepción el resultado de las principales medidas aplicadas. Unos datos que en ocasiones se escapan de las cifras oficiales, por el nivel de escala grande y su concepción de lugar, y que con frecuencia este tipo de datos no se registran en las fuentes oficiales.

De entre los múltiples enfoques metodológicos presentes se optó por elegir desarrollar esta temática desde la perspectiva de la geografía de la percepción. En un mundo virtual donde podemos modelar un espacio sin conocerlo debemos ser conscientes que existen otras variables que afectan a las decisiones que tomamos y que solo podemos conocer desde el propio territorio. Y es aquí donde la geografía de la percepción tiene un papel protagonista. Actualmente, es un campo de interés en un momento donde la sociedad y los fenómenos inherentes a ella cambian a pasos colosales, se transita de un mundo real y tangible a un mundo de espacios virtuales gracias al uso de las tecnologías, construyéndose así dos tipos de explicaciones sobre los lugares, las de quienes los experimentan a través de su vivencia, y las que se construyen mediante los imaginarios por los accesos o paseos virtuales. Y es aquí, donde la geografía de la percepción se posiciona como referente conceptual de técnicas más tradicionales de cartografía social y cartografía participativa (Lindón, 2007a y b).

Para dar unión a estos dos puntos, geografía de la percepción y movilidad, se requería del uso de una serie de geotecnologías concretas. Para ello, se propuso el uso de QGIS+QFIELD+QGIS online ya que facilitaba el desarrollo de un ciclo que iba desde el diseño del SIG, toma de datos en campo, tratamiento de estos y publicación posterior. Como alternativa para alumnos que tenía dificultades a la hora de instalar o trabajar con este paquete se ofreció el uso de Google My Maps.

2.3. Estructura del primer taller geo4space

Concretado el qué se iba a trabajar restaba definir cómo se llevaría a cabo. Dado que era un primer acercamiento, se optó por el diseñó de un curso de corta duración de tres semanas. A lo largo de este tiempo, se combinaron sesiones síncronas con otras asíncronas, en las que los participantes ponían en práctica el conocimiento adquirido. Cerró el seminario, una sesión concebida como un espacio de intercambios de ideas que ofrecerán distintas perspectivas en el tratamiento de información geográfica en relación con la temática planteada.



Figura 2. Cartel informativo del taller en el que se recogieron los principales puntos.

En cuanto al programa, este combinaba formación teórica, pensada para personas que se acercan por primera vez a este campo, y centrada en dos cuestiones fundamentales y muy interconectadas. Por un lado, en el acercamiento a las herramientas propuestas, pero siempre de forma secundaria a la introducción en el diseño e implementación de un proyecto, constituyendo esta parte el eje central. Se ha complementado la teoría con sesiones prácticas centradas en la toma de datos en campo. Esta una de las principales tareas a realizar desde el campo de la geografía de la percepción. Esta parte se desarrolló tanto de forma presencial en la UAM, como de manera asíncrona para el caso de los participantes iberoamericanos.

2.4. Desarrollo de la experiencia

Como se ha comentado, el taller y sus actividades se desarrollaron a través de una modalidad híbrida. Se inició con una primera fase de acercamiento consistente en la presentación de un módulo introductorio, con el que aproximar a los participantes al empleo de las herramientas geotecnológicas a emplear durante el desarrollo de la tarea encomendada, la toma de datos en relación con la movilidad en el interior de un campus. De igual modo, se definieron las metodologías de aplicación y se abrió un espacio cooperativo para la modelación de bases de datos geoespaciales, como hemos podido observar, un punto fundamental en el que se apoyaba el taller y que se vincula con la gestión de proyectos. Esta formación online se desarrolló a través de TEAMS para los participantes iberoamericanos. Esta se repitió de forma presencial para los integrantes de la UAM, en el contexto de la asignatura de Sistemas de Información Geográfica del plan de estudios del doble grado en Geografía y Ciencias Ambientales.

Posteriormente, y continuando el mismo hilo conductor, una vez alcanzado un conocimiento teórico mínimo y con el diseño metodológico y de la base de datos ya preparadas, se trabajó de forma específica en la adquisición de competencias en la toma de datos, de nuevo distinguiendo entre los dos grandes grupos de participantes.

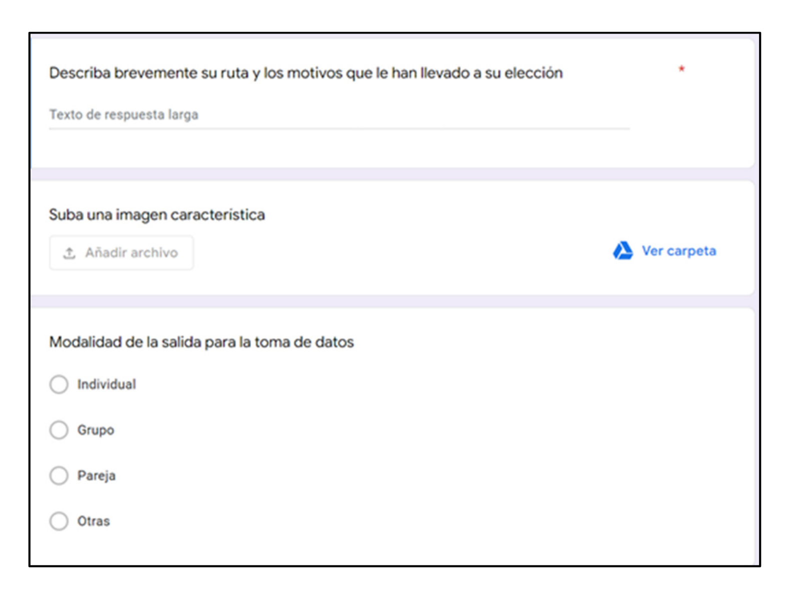


Figura 3. Mediante Google Forms se diseñaron una serie de formulario pensados para los participantes iberoamericanos. Con ellos se buscaba identificar las razones de elección de la ruta e interpretación de datos.

Finalmente, a través de una tercera y última sesión, de forma asíncrona, y con un carácter plenario para todos los participantes con independencia de la modalidad en la que desarrollaron el taller, se creó un espacio a través del cual se compartieron los resultados. Pero también se discutieron e intercambiaron experiencias, se dieron a conocer las lecciones aprendidas y la utilidad de las herramientas, generándose entre los colaboradores, interés por la aplicación en otros casos de estudio como es la disposición de residuos y la ubicación de viviendas de tipo social.

2.1.1. Trabajo asíncrono

Los participantes iberoamericanos formando un grupo de 6 personas en distintos puntos, partiendo del modelo de datos desarrollado en las sesiones síncronas, y haciendo uso de las herramientas propuestas, procedieron a elegir un campus concreto sobre el que desarrollar de forma asíncrona el conocimiento y las competencias adquiridas. Para poder conocer mejor las razones de la elección, las dificultades encontradas

y tener acceso a los datos generados se hizo uso de Google Forms a través del diseño de un formulario que, además, ayudaba a la posterior interpretación de los resultados obtenidos (figura 3). El análisis efectuado arrojó como resultado principal un alto grado de dificultad al dar el salto de lo teórico a lo práctico sin el apoyo de un docente. Ahora bien, sí quedó patente la necesidad de diseñar un buen proyecto y el modelo de datos que recoja la información antes de iniciar la toma de datos.

2.1.2. Toma de datos en la UAM

En este caso, partiendo del estudio del campus de la UAM, se llevó a cabo la misma tarea de toma de datos en relación con la movilidad, pero en este caso dirigido. De esta manera, se diseñó por parte del equipo docente unas grandes rutas que permitieran comprobar alguna de las medidas impulsadas dentro de la UAM para mejorar la movilidad interna (figura 4).

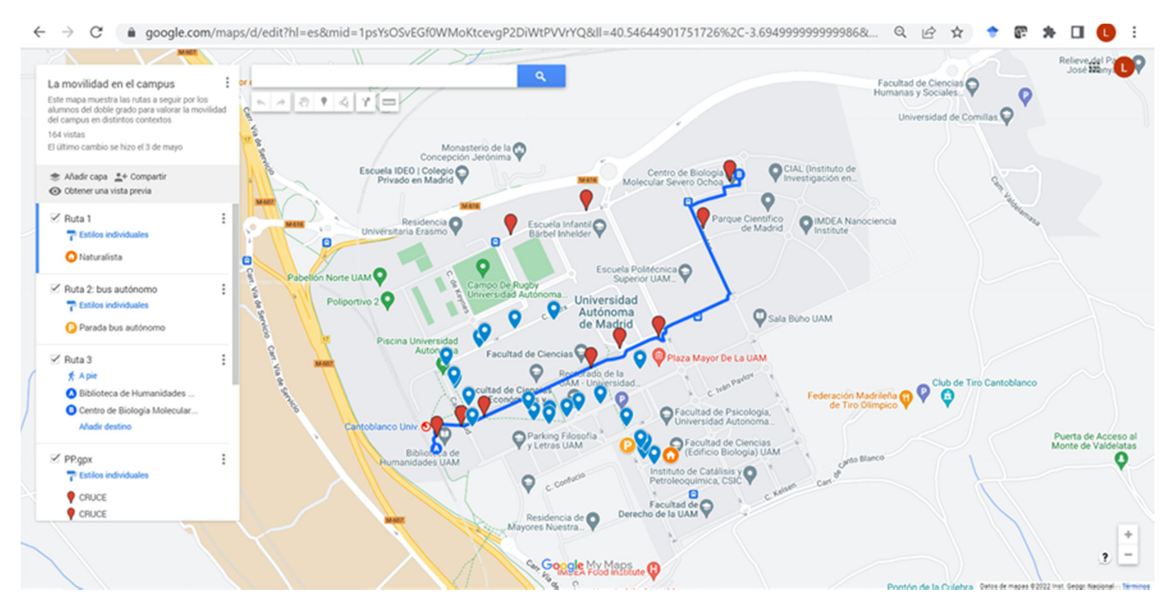


Figura 4. Toma de datos en rutas establecidas y derivas.

Los 28 alumnos participantes fueron divididos en 3 grupos al frente de los cuales se puso a una persona con experiencia que actuaba como tutor. Las funciones de este guía estaban enfocadas a resolver dudas relacionadas con el ejercicio o con las propias herramientas, pero en ningún caso intervenía en otro tipo de decisiones. A cada uno de los grupos se les asignó un medio de movilidad de entre los que son más populares en el campus, bus autónomo, bicicleta y a pie.

El desarrollo de la actividad consistía en la elaboración de rutas derivadas y de una ruta fija en el caso del bus autónomo (figura 5). A lo largo de ellas, los participantes debían establecer diferentes paradas en función de las observaciones y aspectos perceptuales que surjan en el momento, tanto positivos como negativos, y relativos tanto al paisaje como a las infraestructuras que se encontraran. En estos trayectos la libertad de elección, sentidos y criterios de decisión de los participantes cobran protagonismo, así como en el registro de datos y su digitalización mediante las herramientas propuestas.

Para conocer mejor el resultado de la experiencia, mostramos a continuación algunos de los resultados que los alumnos obtuvieron, y donde hemos centrado más la atención en la experiencia y no en el análisis cuantitativo de los mismos. Tomando como ejemplo la experiencia del trayecto realizado en bicicleta, comentar que, en relación con la parte de gestión interna, cada uno de los miembros del grupo cubrió una función específica dentro del grupo. Esta organización les llevó a tener mejores resultados en la obtención de datos. De esta forma, un participante dirigió la ruta siguiendo las sugerencias de Google maps; otro se encargaba de las fotos e iba documentando las infraestructuras; otros, mediante el uso de la APP Qfield, registraba la percepción relacionada con el pavimento, donde coincidía con los vehículos, donde había desniveles, no estaba bien señalizado el parking; mientras, otra persona con el GPS recogía toda la ruta de forma global. De esta breve experiencia se pudo extraer información importante para mejorar la movilidad con este medio de transporte. Así, en este trayecto identificaron dificultades como la inexistencia de lugares con bastidores para bicicletas en algunos puntos concurridos como la residencia universitaria.



Figura 5. Bus autónomo con una ruta circular fija que facilita la movilidad interna en el campus de la UAM.

Con respecto a la ruta a pie, y al igual que la anterior, los alumnos tuvieron que efectuar su propio trazado alternativo a la propuesta base que se les ofreció como punto de partida. De igual modo que con la experiencia anterior, los alumnos guiados por un tutor debían establecer paradas en aquellos puntos que consideraban que tenían un mayor interés (figura 6). En este caso, y al contrario que en el anterior no se produjo ninguna organización lo que provocó que los datos fueran de menor calidad y se requiriera de más tiempo.



Figura 6. Un grupo de alumnos poniendo en práctica las pautas dadas para el empleo de diversas geotecnologías instaladas en sus propios teléfonos móviles.

3. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

La experiencia desarrollada encierra varios objetivos. En primer lugar, y como fase previa, se ha tratado de determinar los retos a los que se enfrenta las enseñanzas basadas en geotecnologías y vincularlos con vacíos existentes en diversos planes de estudios. En una etapa posterior, y sobre este conocimiento, se propuso la elaboración de un taller, concebido como experiencia para generar un programa formativo compuesto por experiencias de corta duración, muy enfocadas a una temática concreta y en las que la planificación y diseño del proyecto tuviera un papel importante, y no solo el uso de determinadas geotecnologías. En este sentido, el desarrollo de la experiencia fue monitorizado. Otro objetivo se centraba en determinar qué modalidad se ajusta más a los objetivos propuesto. De esta forma, se buscaba comprobar la efectividad del desarrollo de talleres simultáneos en entornos diferentes, pero con un mismo planteamiento, para que pudieran funcionar de forma colaborativa. A este respecto, la experiencia consiguió alcanzar un cierto interés, aunque con algunos problemas de organización derivados de la diferencia horaria entre los participantes de la UAM y el grupo iberoamericano. En este sentido, y como medida de cara a futuros eventos, se plantean medidas como el uso de herramientas tipo foro o redes sociales para poder compartir la experiencia y ofrecer apoyo mutuo de forma asíncrona.

La encuesta realizada a los participantes también trataba de indagar sobre la adecuación y contenido de las clases teóricas. En general el contenido sí se vió como acertado así como el material complementario que se les facilitó. Los puntos negativos estuvieron en relación con el número de horas síncronas que se mostraron como insuficientes. Aquí los participantes iberoamericanos tuvieron más problemas a la hora de la toma de datos por no contar con un tutor como si ocurría en el caso del grupo de la UAM. Estas dificultades no estaban relacionadas con el uso de las geotecnologías propuestas sino con la toma de decisiones y la abstracción de la realidad.

En cuanto a las temáticas seleccionadas, los participantes vinculados a niveles formativos más altos fueron los que mostraron un interés más destacado al suponer para ellos un reto la toma de datos vinculados a la percepción de la población de actividades que van más allá de la movilidad pero que requieren de las mismas metodologías y herramientas. En relación con este punto, la experiencia ha permitido más allá de la formación docente, conocer mejor las formas de desplazarse al interior del espacio de un campus universitario, examinando sus bondades y limitaciones, directamente las personas que forman parte de su día a día, por ello, los problemas identificados y las mejoras necesarias estarán fundamentadas en la experiencia de sus usuarios.

Dada la buena acogida, las líneas futuras, en las que se está actualmente trabajando, pasan por continuar con el desarrollo de nuevos talleres, especializados en otras temáticas, pero con las mismas geotecnologías y metodologías que las seguidas en este. Las posibles temáticas han sido extraídas de las encuestas realizadas a los participantes. Entre las posibles temáticas están cuestiones sobre la disposición de residuos y los requerimientos de vivienda social o la gestión de cascos históricos.

4. BIBLIOGRAFÍA

Buzo Sánchez, I. (2014). “Estrategias didácticas innovadoras para la enseñanza de la Geografía con una metodología activa”, en R. Martínez y M.E. Tonda (eds.), *Nuevas perspectivas conceptuales y metodológicas para la educación geográfica*. Grupo de Didáctica de la Geografía de la Asociación de Geógrafos Españoles (A.G.E.), http://www.age-didacticageografia.es/

De Miguel González R. (2013). Aprendizaje por descubrimiento, enseñanza activa y geoinformación: hacia una didáctica de la geografía innovadora. *Didáctica geográfica*, 14, 17-36. http://didacticageografica.age-geografia.es/index.php/didacticageografica/article/view/230

De Miguel González, R. (2021). Didáctica de la geografía y ciudadanía sostenible. *Didacticae: Revista de Investigación en Didácticas Específicas*, 9, 4-6. https://doi.org/10.1344/did.2021.9.4-6

Hernández Requena, S. (2008). El modelo constructivista con las nuevas tecnologías: aplicando el proceso de aprendizaje, RUSC. *Universities and Knowledge Society Journal*, 5 (2), 26-35. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=78011201008

Lindón, A. (2007a). Los imaginarios urbanos y el constructivismo geográfico: los hologramas espaciales. *Revista EURE*, (Vol. XXXIII, Nº 99), 31-46. http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612007000200004

Lindón, A. (2007b). El constructivismo geográfico y las aproximaciones cualitativas. *Revista de geografía Norte Grande*, 37, 5-21. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022007000100001

Lucas García, F., Racero Moreno, J., Torrecillas Lozano, C. y García Sánchez, J. M. (2015). Análisis de la movilidad en campus universitarios integrados en zonas urbanas. *Dyna*, 91 (3), 336-345.

Martínez Medina, R. y Tonda Monllor, M. E. (eds.) (2014). Nuevas perspectivas conceptuales y metodológicas para la educación geográfica. Grupo de Didáctica de la Geografía de la Asociación de Geógrafos Españoles (A.G.E.). http://www.age-didacticageografia.es/

Moreno Jiménez, A. M. (2015). Sociedad de la geoinformación y conducta espacial del ciudadano como nuevos desafíos para la Geografía. Polígonos. *Revista de Geografía*, 27, 25-47. DOI: https://doi.org/10.18002/pol.v0i27.3275

Rodríguez Esteban, A. R. y Vieira Aller, M. J. (2009). La formación en competencias en la universidad: un estudio empírico sobre su tipología. *Revista de investigación educativa*, 27(1), 27-47. https://doi.org/10.1344/did.2021.9.4-6



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 652-658

Integración de la teledetección en nuevas experiencias educativas: el proyecto Edusat

L. Olivas Corominas[1], R. Olivella González [1], J. Sitjar Suñer[1], C. Garcia-Lozano[2]

[1] *Servicio de SIG y Teledetección (SIGTE), Universitat de Girona. Pl. Ferrater Mora, 1, 17004 Girona.*
[2] *Departamento de Ciencias Ambientales, Universitat de Girona. C. Maria Aurèlia Capmany i Farnés, 69, 17003 Girona.*

laura.olivas@udg.edu, rosa.olivella@udg.edu, josep.sitjar@udg.edu, carla.garcia@udg.edu

RESUMEN: La intensificación en las últimas décadas sobre el cambio climático y la degradación de los sistemas naturales ha llevado a una mayor conciencia pública sobre el medio ambiente, especialmente entre los jóvenes que ven peligrar el futuro del Planeta. Dotar de herramientas tecnológicas y competencias necesarias para identificar y evaluar las consecuencias del cambio ambiental global es una necesidad para que este público más joven construya su propio discurso crítico y objetivo en torno al cambio ambiental global. En este contexto nace el proyecto Edusat una web con recursos didácticos para aprender a analizar distintos fenómenos naturales o de origen antrópico a partir de imágenes de satélite y de esta manera, acercar la teledetección a un público que hasta ahora rara vez se involucraba en esta disciplina. La web cuenta con distintos casos de estudio de ejemplo como incendios, inundaciones, procesos de deforestación, deshielo de los glaciares, etc. y una guía didáctica para que el docente pueda trabajar estos temas en el aula.

Palabras-clave: cambio climático, teledetección, guía didáctica, Copernicus

1. INTRODUCCIÓN: LA TELEDETECCIÓN COMO RECURSO EDUCATIVO

Las dinámicas sociales, económicas y territoriales que ha desarrollado la humanidad desde la Primera Revolución Industrial se han caracterizado por un consumo cada vez mayor de los recursos naturales. La explotación de estos recursos ha puesto en grave riesgo el bienestar de los habitantes del planeta Tierra, así como los sistemas físicos que lo sustentan. Este proceso ha sido descrito como "Cambio Ambiental Global" y da como resultado cuatro fenómenos bien conocidos: contaminación, pérdida de biodiversidad, cambio en el uso de la cobertura terrestre y cambio climático (Clark, 1988; Stern et al., 1992). Todos estos procesos conllevan la degradación del medio ambiente y amenazan la prosperidad de plantas, animales y personas en el planeta (Riebsame et al., 1994; De Chazal y Rounsevell, 2009; Oliver y Morecroft, 2014).

La fuerza científica de las consecuencias negativas del cambio climático, la contaminación o la pérdida de biodiversidad intensifica aún más la reflexión crítica entre los ciudadanos. Este sentido de protesta y lucha es especialmente intenso entre los jóvenes, que luchan contra la pasividad de los gobiernos en las políticas de mitigación del cambio climático. Como tal, estos jóvenes deben tener las competencias necesarias para evaluar y difundir las consecuencias del cambio ambiental global de manera crítica y objetiva.

En este sentido, el programa europeo Copernicus de observación de la Tierra, coordinado y gestionado por la Comisión Europea y la Agencia Europea de Medio Ambiente, ofrece un conjunto completo de datos abiertos e imágenes de satélite que abre un abanico de posibilidades a estas futuras generaciones para analizar de manera objetiva el estado de salud del Planeta.

Gracias al programa Copernicus tenemos a disposición una gran cantidad de datos e imágenes de satélite, de las misiones Sentinel, de manera abierta y casi a tiempo real de todo el mundo. Estos datos están disponibles a través de varios sitios web, aplicaciones y servicios, y también están diseñados para diferentes perfiles de usuario, desde los más especializados hasta los menos experimentados. En el caso que nos ocupa, destacamos la aplicación EO Browser (https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/), desarrollada por Sentinel Hub y financiada por la ESA, que permite al usuario explorar, analizar y descargar imágenes de satélite de todo el mundo y provenientes de distintos satélites como Sentinel, Landsat, Modis o Envisat. Esta aplicación

es una herramienta de libre acceso que ofrece funciones básicas como la visualización de imágenes de satélites en color natural; así como parámetros avanzados de combinaciones de bandas o la aplicación de múltiples índices mediante algoritmos interbandas. EO Browser es un navegador web muy intuitivo y enfocado a un público no especializado el cual permite detectar de manera fácil y rápida, a partir del tratamiento de imágenes de satélite, fenómenos naturales como incendios, inundaciones, procesos de urbanización, deforestación, retroceso de los glaciares, erupciones volcánicas, etc. y evaluar los cambios en la superficie terrestre.

En este contexto, desde el SIGTE – Servicio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección de la Universitat de Girona, y gracias a la financiación del programa Cordinet y la Universitat de Girona, hemos desarrollado el proyecto educativo Edusat. El objetivo principal de Edusat es acercar la teledetección a un público no especializado y proporcionar material de apoyo a profesores y estudiantes, especialmente de secundaria, para que puedan identificar y analizar estos fenómenos naturales reales en el aula. A la vez, Edusat presenta una propuesta didáctica para que los docentes puedan llevar a cabo una actividad educativa en clase. Hasta el momento no existe ningún recurso didáctico que reúna toda esta documentación en un mismo sitio web.

2. EDUSAT, RECURSO EDUCATIVO PARA APRENDER A OBSERVAR LA TIERRA

2.1. La plataforma Edusat

Edusat (https://www.edusat.com/) es una plataforma web –abierta a toda la comunidad educativa – que contiene recursos educativos para la exploración de imágenes de satélite y fenómenos naturales. La web se puso en marcha en mayo de 2021 y es una plataforma multilingüe que actualmente está disponible en catalán, castellano e inglés. Edusat ofrece recursos didácticos como infografías, videotutoriales, lapsos de tiempo, mapas, gifs animados, etc. para explicar claramente el cambio ambiental global. Consta de tres recursos principales:

- Principios de la teledetección

En este apartado se introduce de manera didáctica la ciencia de la Teledetección, así como se explican los distintos tipos de satélite y se presentan los conceptos de radiación electromagnética, firma espectral y combinación de bandas. A partir de imágenes, infografías y utilizando un lenguaje ameno se muestran los fundamentos de la percepción remota (Figura 1).

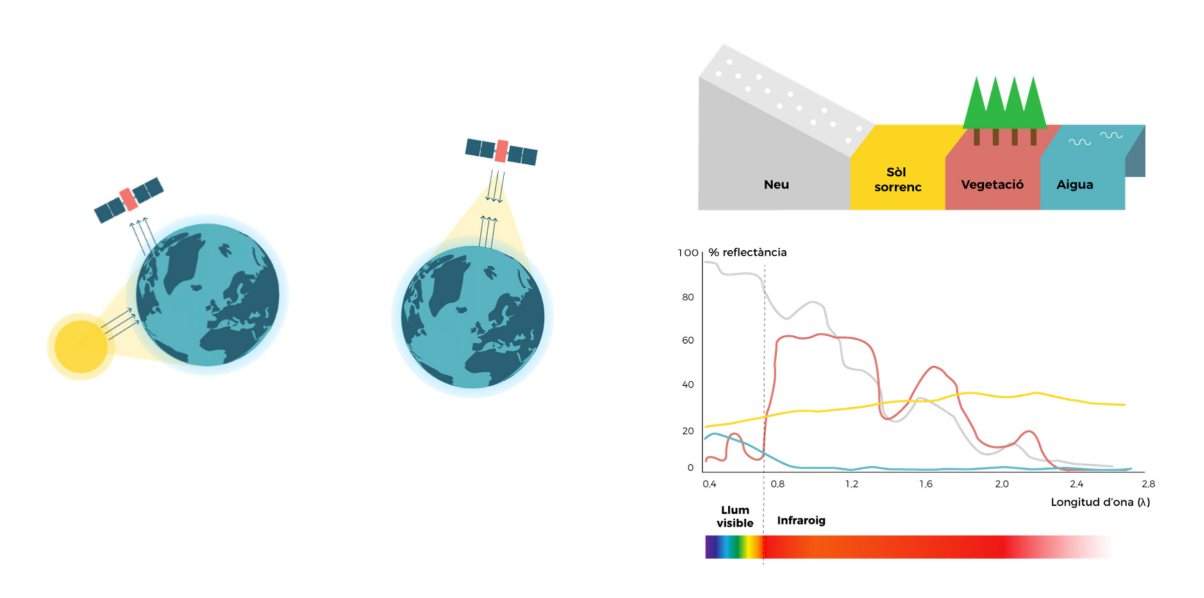


Figura 1. Ejemplos de infografías. A la izquierda se muestran los distintos tipos de sensores (activos y pasivos), mientras que, en la derecha, ilustra la firma espectral de los diferentes objetos terrestres.

- Casos de estudio

En el momento de escribir este artículo se han desarrollado nueve casos de estudio que nos permiten demostrar la utilidad de las imágenes de satélite para observar y analizar los fenómenos actuales del cambio

ambiental global. Los casos prácticos van acompañados de vídeos que explican paso a paso cómo obtener los resultados que mostramos para cada fenómeno estudiado para que el usuario pueda obtener los mismos resultados utilizando los vídeos como guía de inicio rápido. Se ha escogido como mínimo un caso de estudio representativo para cada fenómeno y contexto geográfico (Tabla 1).

Tabla 1. Estudios de caso para el análisis territorial basado en la teledetección

Fenómeno	*Caso de estudio*	*Fechas*
Incendios	Ribera d'Ebre, España	26 de junio de 2019
	Amazonia, América del Sud	Verano 2019
Erupciones volcánicas	Kilauea, Hawaii	3 de mayo – 15 de agosto de 2018
	Etna, Italia	Octubre 2019
Inundaciones	Borrasca Gloria, España	20 de enero de 2020
Sequías	Acuelo lagoon, Chile	Septiembre de 2016 – Octubre 2019
Regresión glaciar	Aneto, España	2015 – 2019
	Amery Ice Bar, Antártida	Octubre 2019 – Febrero 2020
Deforestación	San José de Chiquitos, Bolivia	Agosto 2015 – Noviembre 2020
Urbanización	Beijing airport, China	2014 – 2019

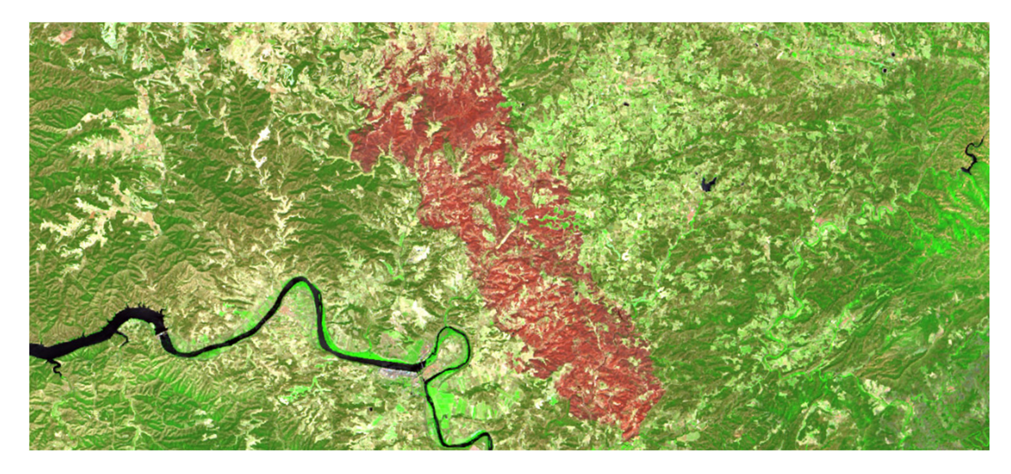


Figura 2. Caso de estudio del incendio de la Ribera d'Ebre. Imagen de satélite del Sentinel-2 del 30 de junio de 2019. Combinación de bandas en falso color (12-8-4).

- Guía didáctica

En este apartado se ha definido una propuesta didáctica para llevar a cabo una actividad o taller utilizando todos los recursos disponibles en la web. Esta actividad se pueda adaptar y desarrollar en función del contexto educativo (nivel, número de estudiantes, etc.), la disponibilidad de tiempo y los recursos que se dispongan (formación previa del profesorado, ordenadores, aulas, etc.). La guía didáctica se estructura como una sola sesión de 1 o 2 horas o bien un conjunto de sesiones. En el siguiente capítulo (3.1) se explica el desarrollo de esta propuesta didáctica a partir de las distintas experiencias que se han llevado a cabo con estudiantes de secundaria.

3. EXPERIENCIAS EDUCATIVAS EN EL AULA CON EDUSAT

Aunque Edusat está pensado como un recurso más para el autoaprendizaje de docentes y estudiantes, desde su lanzamiento en mayo de 2021, hemos llevado a cabo distintos talleres y seminarios con estudiantes de secundaria y primaria que nos han permitido poner en práctica la propuesta didáctica que planteamos. En este artículo queremos compartir algunas de estas experiencias educativas que hemos impartido hasta el momento:

Tabla 2. Talleres Edusat llevados a cabo en centros educativos

Institución	*Edad*	*Duración*	*Número de estudiantes*	*Formato*
Fundación de niños y niñas con altas capacidades (FANJAC)	13-17	12 horas (4 sesiones de 3 horas)	20	Presencial
Fundación de niños y niñas con altas capacidades (FANJAC)	11-15	3 horas	20	Presencial
Instituto Rafael Campalans (Anglès)	17-18	1 hora	25	Presencial
Campus PreBat (Universidad de Girona)	15-16	2 horas	30	Online
Campus Jove de Recerca (Universidad de Girona)	17-18	2 horas	40	Presencial
Instituto Inmaculada Concepció (Lloret)	17-18	1 hora	20	Presencial
Instituto Montessori (Girona)	17-18	1 hora	37	Presencial
Instituto Josep Brugulat (Banyoles)	15-16	1 hora	150	Presencial
Instituto Maçanet de la Selva	15-16	1 hora	90	Presencial

Por lo general, cabe decir que la mayoría de los talleres se han organizado en colaboración con el Departamento de Geografía de la Universitat de Girona con el objetivo de difundir la disciplina de la geografía y animar a los jóvenes a estudiar esta materia. También desde del servicio de promoción de la misma universidad se ha programado la realización del taller en el marco de los Campus Jove de Recerca i Campus PreBat con el objetivo de mostrar y difundir las investigaciones y proyectos que se están realizando en la Universitat de Girona y acercar a los jóvenes al mundo académico. En este sentido, la mayoría de los talleres se han llevado a cabo de forma presencial en las aulas de informática de la Facultad de Lletres i de Turisme de la universidad y, por tanto, fuera de las aulas habituales de los estudiantes.

Por otra parte, el componente tecnológico y digital de la actividad ha permitido que también pudiera impartirse de virtualmente, especialmente durante el confinamiento, cuando las medidas derivadas de la pandemia eran más restrictivas.

3.1. Metodología del taller

La actividad consta de 3 bloques, sin embargo, en función del contexto, la actividad se ha tenido que adaptar a las demandas del profesorado, disponibilidad de tiempo, número de estudiantes o el formato. Seguidamente se describen los pasos a seguir de una actividad tipo de 2 horas de duración:

- **Bloque 1. Contexto e ideas previas.** Duración estimada: 1 hora
  - Fundamentos de la teledetección

Consta de una sesión teórica en la cual el docente explica los principios de la teledetección (satélites, sensores, radiación electromagnética y combinaciones de bandas), mostrando a los alumnos cómo esta tecnología puede ayudar a detectar desastres naturales o la actividad humana derivada de la crisis climática. El objetivo de este bloque es proporcionar a los estudiantes un contexto sobre el tema del cambio ambiental global y explicar los principios de la teledetección de una manera sencilla y amena.

  - Introducción a EO Browser

Los alumnos aprenden a usar la aplicación EO Browser para buscar imágenes de satélite según una fecha concreta y hacer combinaciones de bandas para identificar fácilmente los cambios que se han producido en el territorio. También aprenden a crear comparaciones entre el antes y después de un fenómeno, así como a crear animaciones comparando varias imágenes de satélite del mismo lugar tomadas en diferentes fechas y así poder visualizar la evolución de un fenómeno natural.

- **Bloque 2. Investigación de un nuevo caso de estudio.** Duración estimada: 30 minutos

El segundo bloque se basa en el trabajo en grupo. El objetivo es explorar la información que nos dan los satélites sobre un evento concreto e identificar qué cambios se produjeron antes y después del fenómeno.

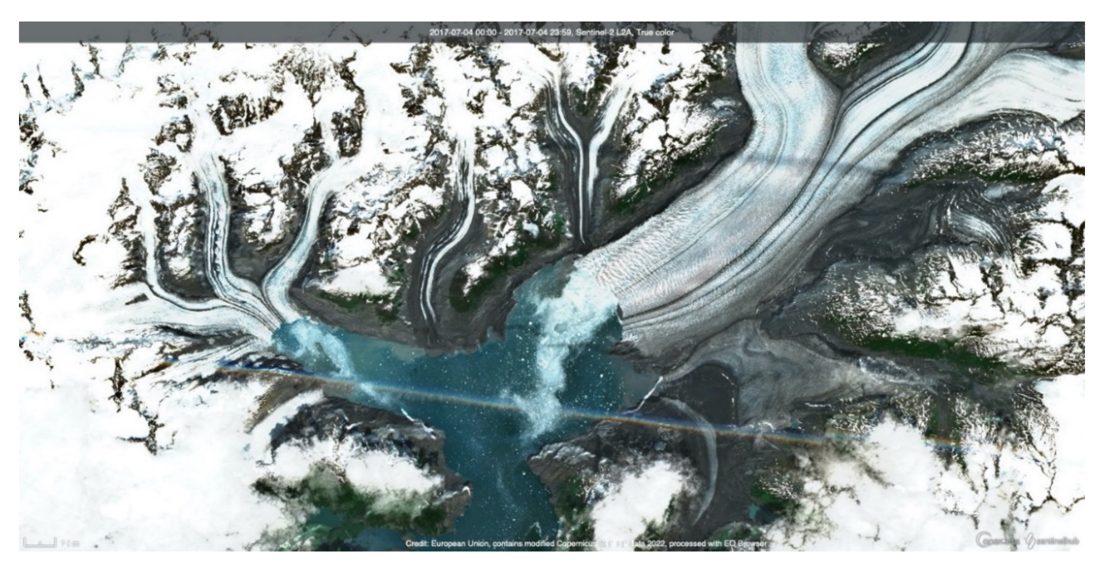
Los estudiantes deben buscar en medios digitales y recopilar información sobre el caso de estudio escogido (fecha exacta en que ocurrió el fenómeno, dónde ocurrió, fotografías del evento y cualquier otra información que pueda ser de interés para su investigación). Luego deben explorar imágenes de satélite usando la aplicación EO Browser y hacer las combinaciones de bandas correspondientes para producir un resultado.

- **Bloque 3. Presentación de los resultados.** Duración estimada: 30 minutos

Finalmente, cada grupo presenta su investigación explicando los resultados al resto de los grupos. Para la presentación, el grupo tiene que compartir las imágenes de satélite y explicar por qué ha utilizado ciertas combinaciones de bandas y no otras. En este bloque, el alumno también puede practicar habilidades y técnicas de comunicación que también están relacionadas con la información geográfica, como los *story maps*.

3.2. Consideraciones acerca la práctica educativa de Edusat

Durante los talleres se ha notado un compromiso y una actitud proactiva de los estudiantes que se han mostrado partícipes a la hora de investigar y explorar por sí mismos los fenómenos naturales escogidos por cada grupo. Los alumnos han podido explorar diferentes casos de estudio documentados en la web como el incendio forestal en la comarca de la Ribera d'Ebre, los efectos del temporal Gloria en el litoral catalán o los incendios en la Amazonia. No obstante, también han explorado y propuesto otros fenómenos naturales más actuales y mediáticos como el volcán de La Palma en Canarias, los incendios de Australia o el retroceso de los glaciares en Alaska.



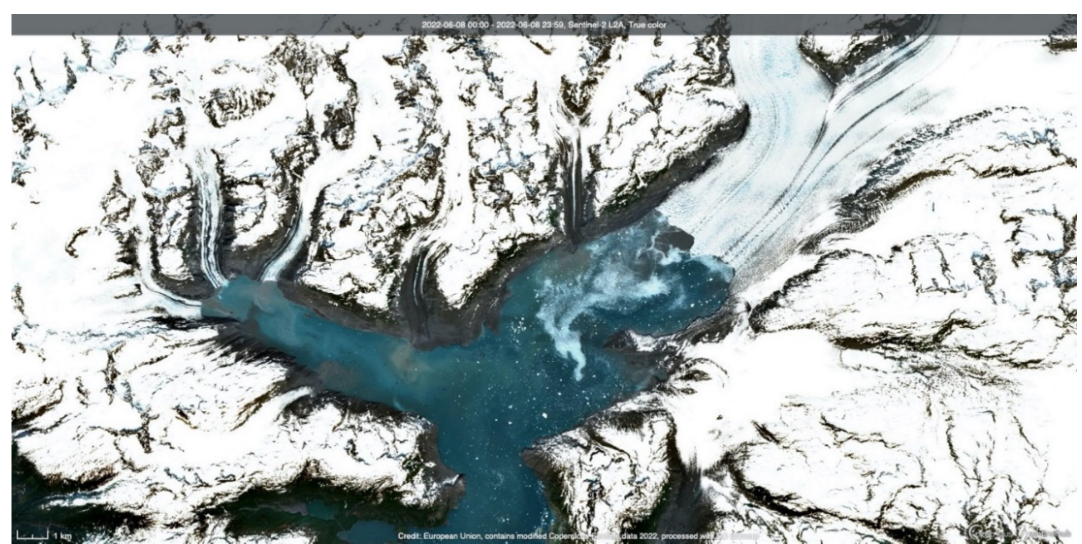


Figura 3. Retroceso del glaciar de Columbia, caso de estudio investigado por los estudiantes. En la imagen superior Sentinel-2 tomada el 4 de julio de 2017 se puede ver como el glaciar ocupaba una superficie mucho mayor que en la imagen inferior tomada el 8 de junio de 2022.

Como se ha podido observar por parte del profesorado durante los talleres, el taller de Edusat estimula los procesos cognitivos del pensamiento espacial y del aprendizaje activo. Al margen de su edad, los participantes en los talleres han mostrado interés por la materia y han obtenido resultados ciertamente inspiradores. Han curioseado con las combinaciones de bandas obteniendo imágenes interesantes, tanto desde el punto de vista científico, como artístico. Ellos mismos han quedado sorprendidos de lo que han sido capaces de hacer mediante las imágenes de satélites. Los profesores nos hemos sorprendido viendo como en pocas horas los alumnos han aprendido a hacer lo que nosotros llevamos meses trabajando: entender las bases científicas de la teledetección y poderlas aplicar para la observación de un fenómeno real y contemporáneo.

Cada experiencia educativa ha sido diferente ya que ha tenido que adaptarse al contexto educativo de cada grupo. Cabe destacar que los conocimientos previos sobre Teledetección eran casi nulos, pues no es una materia que forme parte del currículum de secundaria. Un factor fuerte del taller es su flexibilidad, que nos permite adaptar el contenido y los ejercicios a diferentes niveles y edades. De las experiencias educativas que se han organizado la mayoría ha sido entre edades de 15 a 18 años, es decir, de 3r curso de secundaria a Bachillerato. Sin embargo, también hemos tenido la oportunidad de testear la actividad a un nivel inferior y hacerlo para grupos de 1r y 2º curso de secundaria (11-14 años).

Otro factor clave de esta actividad es la flexibilidad en el tiempo ya que permite adaptarse a la disponibilidad de cada centro educativo y, por tanto, hemos podido alargar el taller hasta 12 horas cuando los tutores nos lo han pedido o reducirlo incluso a 1 hora de duración.

Edusat brinda una experiencia educativa que permite utilizar la ciencia de la Teledetección en el ámbito educativo. Algunas de las ventajas que destacamos de esta actividad son:

- Un aprendizaje simultáneo entre alumnado y profesorado. El profesorado tiene el papel de acompañar a los estudiantes en el proceso de investigación de los casos de estudio propuestos por los mismos estudiantes.
- Una aproximación al territorio tanto local como global, puesto que los estudiantes pueden explorar fenómenos a distintas escalas.
- Pensamiento crítico y reflexivo, a partir del análisis, síntesis y evaluación de un fenómeno natural.
- Inteligencia lógica y matemática: puesto que requiere habilidad para interpretar y utilizar variables numéricas y utilizar la tecnología para su adquisición, procesamiento y transferencia.
- Inteligencia espacial, puesto que hace falta orientarse espacialmente a través de mapas e imágenes de satélite.
- Capacidad comunicativa, habilidad para transmitir de forma efectiva y a través de varios métodos de representación de la información los resultados de la investigación.

Y podríamos añadir otros aspectos/competencias que podríamos atribuir al uso de la teledetección en el ámbito docente:

- El uso de tecnologías emergentes, como la teledetección, para analizar cambios territoriales en tiempo real.
- La incorporación de un punto de vista geográfico a través de herramientas de teledetección para analizar fenómenos vinculados al cambio ambiental global y, en particular, al cambio climático.
- Conocer recursos objetivos y científicos con jóvenes y adolescentes.
- Introducir materiales y recursos transdisciplinares para trabajar en diferentes disciplinas.

A pesar de las potencialidades que presenta el recurso educativo Edusat, esta plataforma cuenta con una serie de riesgos que no debemos menospreciar. En primer lugar, los casos de estudio que se crearon durante 2019 y en su momento presentaban gran interés por su actualidad, con el tiempo han ido perdiendo dicha relevancia, lo que implica una constante actualización de los casos de estudio mostrados. En segundo lugar, y también con relación a la actualización del contenido, Edusat se alimenta del recurso digital EO Browser, un proyecto dinámico y con constantes cambios en su funcionamiento. Esto implica una actualización de los recursos audiovisuales y gráficos que proporciona Edusat para facilitar la utilización de la plataforma EO Browser.

Con todo esto, Edusat es un proyecto que deberá estar constantemente actualizado y esto conlleva

una constante dedicación y esfuerzo en relación con los recursos humanos y de financiación destinados a este recurso.

4. CONCLUSIONES

Lejos de ser una disciplina reservada a los especialistas y reducida a un selecto grupo de profesionales, la teledetección es una herramienta asequible y altamente educativa a la hora de mostrar a jóvenes, educadores y científicos otra forma de estudiar la realidad y difundir los resultados. Gracias al programa EU Copernicus y a algunas de las herramientas que se han promovido a su alrededor como EO Browser, la Teledetección se hace accesible a un público no especialista como son los estudiantes o educadores.

En conclusión, el proyecto educativo Edusat promueve una visión objetiva y analítica de los procesos territoriales resultantes del cambio ambiental global. A través de la enseñanza de la teledetección y mediante una serie de casos de estudio reales, se proporcionan las herramientas para dotar de contenido empírico un discurso teórico. Edusat proporciona el conocimiento para entender la teledetección y utilizar recursos digitales para observar y analizar los procesos antrópicos y naturales que suceden en la superficie terrestre. Con ello, Edusat es una herramienta útil para invitar a docentes y estudiantes a descubrir casi en tiempo real los fenómenos naturales que amenazan los sistemas naturales del planeta.

Además, Edusat pretende llegar a toda la ciudadanía con el objetivo de apoyar mediante base científica el discurso ecologista que emerge entre los jóvenes.

AGRADECIMIENTOS

Edusat ha sido desarrollado con la financiación del programa Cordinet de la Comisión Europea, así como financiación local de la Universidad de Girona por lo que nos gustaría agradecer a estas instituciones su apoyo.

5. BIBLIOGRAFÍA

Clark, W.C. (1998). The human dimensions of global environment change. En: *Committee on Global Change. Towards an Understanding of Global Change*. National Academy Press, Washington, DC.

De Chazal, J. y Rounsevell, M. (2009). Land-Use and Climate Change within Assessments of Biodiversity Change: A Review. *Global Environmental Change*, 19, 306-315. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.09.007

Oliver, T. y Morecroft, M. (2014). Interactions between climate change and land use change on biodiversity: Attribution problems, risks, and opportunities. *Wiley interdisciplinary reviews: Climate Change*, 5(3), 317-335. https://doi.org/10.1002/wcc.271

Riebsame, W.E., Meyer, W.B. y Turner II, B.L. (1994). Modeling land use and cover as part of global environmental change. *Climatic Change*, 28, 45–64.

Stern, P.C., Young, O.R., Druckman, D.E. (1992). *Global environmental change: Understanding the human dimensions*. National Academy Press.

Edusat Website: www.edusat.com, última visita: 14 de mayo 2022.

EOBrowser: Website: https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser última visita: 14 de mayo 2022.

Sentinel-Hub: Website: https://www.sentinel-hub.com última visita: 14 de mayo 2022.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 659-668

Las Tecnologías de la Información Geográfica y los Objetivos de Desarrollo Sostenible en el diseño de proyectos en la Educación Secundaria Obligatoria. Elaboración de una propuesta en el IES Albuhaira (Islas Baleares)

A. Pons Esteva[1]

[1] *Departamento de Geografía, Universitat de les Illes Balears. Cra de Valldemossa Km 7,5, 07122 Palma (Illes Balears)*

antoni.pons@uib.cat

RESUMEN: El trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de la ONU y el uso de las Tecnologías de Información Geográfica (TIG) pueden contribuir a acercar la geografía al alumnado de secundaria.
La presente investigación se centra en una experiencia novedosa realizada en el IES Albuhaira (Muro, Illes Balears). En la programación de la asignatura de Geografía e Historia de 3º de la ESO se diseñó una situación de aprendizaje para trabajar los ODS y las TIG. La experiencia nos permite confirmar que las TIG pueden ser herramientas adecuadas en la educación secundaria. La mejora de las infraestructuras informáticas en los centros educativos de las últimas décadas y la disponibilidad de aplicaciones como las Web SIG, permiten afrontar proyectos como el actual con garantía. Por otro lado, la geografía como ciencia que estudia la relación entre actividad humana y medio ambiente, se convierte en una materia clave para el trabajo de los ODS y así dar respuesta a los retos ambientales actuales. El principal escollo continúa siendo la escasa adaptación del currículo de la asignatura. El nuevo currículo de la Educación Secundaria Obligatoria establecido por el Real Decreto 217/2022 no recoge entre sus competencias específicas y criterios de evaluación para la asignatura de Geografía e Historia ninguna referencia explícita a las TIG.

Palabras clave: Educación Secundaria Obligatoria, TIG, ODS, Mallorca, LOMLOE.

1. LA GEOGRAFÍA EN LA EDUCACIÓN SECUNDARIA

Baile (1981) apuntaba la necesidad de acercar a los institutos la geografía de las universidades y del mundo profesional anglosajón que difería del estudio tradicional regional que se hacía en las clases. Desde entonces muchos autores (González, 2018; Macía et al., 2017) han reivindicado un nuevo modelo de enseñanza de la geografía basado en aquellos temas actuales del conocimiento geográfico, alejados de la simple geografía regional descriptiva.

Según un estudio reciente realizado en alumnos del I.E.S. “El Tablero” de Córdoba, en el cual se consultaron mediante un cuestionario alumnos de 1º, 2º y 3º de la ESO, y de 2º de bachillerato (Lara Fuillerat y Moraga Campos, 2018), no existe entre los alumnos de secundaria una gran consideración por el estudio de la Geografía, a la que se sigue considerando una asignatura poco útil a efectos prácticos. Souto González (1998) apuntaba en ese sentido a que los alumnos desprecian aquello que creen que no es significativo para su aprendizaje. Además, destacaba la necesidad de formular propuestas motivadoras basadas en el estudio de problemas ambientales o sociales y en metodologías activas.

Así pues, parece imprescindible proceder a una actualización no sólo de contenidos (García Pérez, 2017) sino de metodologías. Para ello es preciso apostar por la enseñanza activa de la asignatura: espacio geográfico como espacio social, capacidades espaciales, educación en valores, TIG (Marrón, 2011).

La presente investigación se centra en el estudio de una experiencia docente llevada a cabo en un instituto de secundaria de la isla de Mallorca. Se diseñó una situación de aprendizaje para la asignatura de Geografía e Historia de 3º de ESO, en la que se propuso trabajar los ODS y utilizar herramientas TIG, y se implementó en el aula.

1.1. Los objetivos de desarrollo sostenible y la geografía

La Asamblea General de las Naciones Unidas aprobó en el año 2015 la Agenda 2030 como plan de acción para alcanzar el desarrollo sostenible. Para ello la Agenda propone 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con un total de 167 metas que abarcan desde el ámbito socioeconómico al ambiental (ONU, 2015).

En el contexto internacional se prevé que cada país incorpore a su legislación educativa las herramientas necesarias para adoptar gradualmente la Agenda 2030 (Llorente-Adán, 2021). La educación para la sostenibilidad (EDS) debe tener como principal objetivo transformar la educación y formar una nueva ciudadanía global sostenible, y ello puede conseguirse a través de la mejora de la enseñanza y el aprendizaje de la geografía en el marco de los ODS (Granados y Medir, 2021). Una de las finalidades de la materia de geografía que se imparte en la Educación Secundaria Obligatoria es dar a conocer las interrelaciones entre las actividades humanas y el medio físico y natural, lo cual facilita el acercamiento a los valores ecológicos. Además de tratar contenidos teóricos sobre las relaciones del ser humano y el medio ambiente (consumo de recursos, producción de residuos, sostenibilidad…) también es necesario favorecer la adquisición de actitudes participativas que promuevan la conservación del patrimonio medioambiental y el mantenimiento del equilibrio entre naturaleza y acción antrópica, todo ello en consonancia con los ODS de la Agenda 2030.

El nuevo currículo de la Educación Secundaria Obligatoria establecido por el Real Decreto 217/2022, de 29 de marzo, recoge la necesidad que los alumnos desarrollen un estilo de vida sostenible acorde con los ODS planteados en la Agenda 2030, en el marco de la Competencia ciudadana. Así mismo el decreto recoge entre las competencias específicas de la asignatura de Geografía e Historia la de conocer los principales desafíos a los que se enfrenta la sociedad en la actualidad, haciendo especial hincapié en el reto de los ODS.

1.2. Las Tecnologías de la Información Geográfica en la educación secundaria

En las últimas décadas se han incrementado de manera espectacular los nuevos recursos vinculados con la información geográfica; visores cartográficos, programas de cartografía digital, SIG on–line, aplicaciones para smartphones y tabletas digitales y su uso como GPS, aplicaciones de geolocalización, entre otros (de Miguel González, 2013).

Por ello resulta determinante cambiar metodologías y contenidos en las asignaturas de geografía y fomentar el uso de las TIG (Nieto y Siegmund, 2019) que deberían considerarse como una oportunidad para la enseñanza y el aprendizaje de la materia (de Làzaro y González, 2005). Los análisis comparativos de currículos europeos y otros países desvelan la transición de la enseñanza de una geografía descriptiva a una geografía comprensiva, explicativa, analítica e incluso propositiva (de Miguel González, 2013). Además, es cada vez mayor el número de autores que destacan el papel de la geoinformación en el proceso de aprendizaje de la materia (Bouzo, 2016; Sebastián-López y de Miguel-González, 2017; Kolvoord, 2012; Nieto y Siegmund, 2019).

Las directrices europeas en educación han impulsado la progresiva implantación del aprendizaje por competencias y la geoinformación debe ser un factor fundamental en su adquisición. La geoinformación es un factor fundamental en la adquisición de la competencia de aprender a aprender, aquella más relacionada con el aprendizaje autónomo y la enseñanza activa (de Miguel González, 2013) y de la competencia digital (Sebastián-López y de Miguel-González, 2017). Algunos autores incluso se refieren a la necesidad de desarrollar una nueva competencia basada en la ciudadanía espacial (Gryl, I, Jekel, & Donert, 2010).

A pesar de las posibilidades que puede suponer la utilización de las TIG en el trabajo competencial, su impacto no ha sido tan generalizado en la enseñanza. La presencia de la geoinformación en los materiales y libros de texto de secundaria es testimonial. Por ello algunos autores apuntan a la necesidad de simplificar el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las TIG con el objeto de expandir y optimizar su aprendizaje en la educación secundaria (Kolvoord, 2012).

2. METODOLOGÍA

La experiencia analizada en este trabajo se desarrolló en el I.E.S. Albuhaira, ubicado en el municipio turístico de Muro en Mallorca. Dicho municipio se encuentra situado en la bahía de Alcudia, y tiene una extensión de 58,5 Km^2 y una población de 7.515 habitantes, según el padrón de 2021.

2.1. Fase de diseño de la situación de aprendizaje

En primer lugar, se diseñó una situación de aprendizaje sobre los problemas, impactos y retos ambientales en el mundo actual. En dicha situación se propuso trabajar con los ODS y las TIG, todo ello en el marco previsto por la Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, por la que se modifica la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación (LOMLOE) y el Real Decreto 217/2022, de 29 de marzo, por el que se establece la ordenación y las enseñanzas mínimas de la Educación Secundaria Obligatoria.

Según la LOMLOE las situaciones de aprendizaje son situaciones y actividades que implican el despliegue por parte del alumnado de actuaciones asociadas a competencias clave y competencias específicas y que contribuyen a la adquisición y desarrollo de las mismas. A continuación, se detallan los elementos esenciales de la situación de aprendizaje diseñada para este trabajo.

Justificación

La finalidad de la situación era la de dar a conocer a los alumnos los principales desafíos a los que se enfrenta la sociedad relacionados con la problemática ambiental actual, valorando propuestas y alternativas mediante el trabajo con los ODS y la utilización de las TIG. Con ello se pretendían alcanzar objetivos de la ESO como desarrollar destrezas básicas en la utilización de las fuentes de información, así como valorar críticamente los hábitos sociales relacionados con el medio ambiente, contribuyendo a su conservación y mejora.

La situación de aprendizaje diseñada además pretendía fomentar el desempeño de competencias clave de la etapa como la competencia ciudadana fomentando el compromiso del alumnado con el desarrollo sostenible o la competencia digital fomentando el uso de diferentes herramientas digitales con el objeto de crear contenidos digitales y construir conocimiento.

Identificador: etapa, nivel y áreas de conocimiento

La situación de aprendizaje se diseñó para alumnos de 3º de ESO. En la asignatura de Geografía e Historia se trabajan contenidos básicamente de geografía humana y económica, pero también se tratan algunos contenidos relacionados con el medio físico y el medio ambiente. Aunque en el primer curso de la ESO se trabajan de manera más amplia estos conocimientos, el nivel que se requiere para el trabajo con los ODS y las TIG hacen preferible impartir la situación de aprendizaje en 3º. En nuestro caso, en el curso de 3º de la ESO había 65 alumnos y alumnas, de edades comprendidas entre 14 y 15 años, en tres grupos relativamente homogéneos de entre 20 y 23 alumnos por grupo.

Título

En las situaciones de aprendizaje se recomienda que el título se plantee mediante una pregunta que lance un reto, en nuestro caso la pregunta que se planteó era doble ¿Por qué no es sostenible nuestro modelo de desarrollo? y ¿Cuál debe ser el modelo de futuro? Se precisaba la doble cuestión porque en realidad eran dos los retos planteados, uno relacionado con la necesidad de conocer la problemática ambiental actual y el otro con buscar las alternativas y soluciones a los desafíos.

Competencias específicas y criterios de evaluación vinculados

Las competencias específicas son los desempeños que el alumnado debe poder desplegar en actividades o en situaciones cuyo abordaje requiere de los saberes básicos de cada materia y los criterios de evaluación deben constituir los referentes que indican los niveles de desempeño esperados en el alumnado. En la Tabla 1 se recogen las competencias específicas y los criterios de evaluación vinculados con la presente situación de aprendizaje.

Saberes básicos

Los saberes básicos constituyen los conocimientos, destrezas y actitudes que constituyen los contenidos propios de la materia cuyo aprendizaje es necesario para la adquisición de las competencias específicas. A raíz de lo expuesto en apartados anteriores se procedió a la selección de los saberes básicos (Tabla 2)

Metodología

La metodología de una situación de aprendizaje debe ser adecuada al enfoque competencial y fomentar estrategias de aprender a aprender, autorregulación del aprendizaje, uso de las tecnologías de la información y comunicación, trabajo colaborativo y atención a la diversidad. En ese sentido y para nuestra situación de aprendizaje se consideraron las siguientes estrategias:

- Se propuso la realización de un proyecto que consistía en la elaboración en clase de un póster sobre problemas ambientales y objetivos de desarrollo sostenible. El trabajo por proyectos favorece las estrategias de aprender a aprender y la autorregulación del aprendizaje.

- El póster se debía diseñar utilizando aplicaciones digitales (presentaciones de Google, canva, etc.) para fomentar el uso de nuevas tecnologías.
- Se preveía el trabajo en grupos de un máximo de 3 alumnos, lo cual debía permitir el trabajo colaborativo, así como una atención más personalizada.

Tabla 1. Competencias específicas y criterios de evaluación vinculados. Anexo II del Real Decreto 217/2022

Competencia específica	*Criterios de evaluación*
1. Buscar, seleccionar, tratar y organizar información sobre temas relevantes del presente y del pasado, usando críticamente fuentes históricas y geográficas, para adquirir conocimientos, elaborar y expresar contenidos en varios formatos.	1.3 Transferir adecuadamente la información y el conocimiento por medio de narraciones, pósteres, presentaciones, exposiciones orales, medios audiovisuales y otros productos.
3. Conocer los principales desafíos a los que se han enfrentado distintas sociedades a lo largo del tiempo, identificando las causas y consecuencias de los cambios producidos y los problemas a los que se enfrentan en la actualidad, mediante el desarrollo de proyectos de investigación y el uso de fuentes fiables, para realizar propuestas que contribuyan al desarrollo sostenible	3.1 Conocer los Objetivos de Desarrollo Sostenible, realizando propuestas que contribuyan a su logro, aplicando métodos y proyectos de investigación e incidiendo en el uso de mapas y otras representaciones gráficas, así como de medios accesibles de interpretación de imágenes.

Tabla 2. Saberes básicos. Anexo II del Real Decreto 217/2022

Bloque	*Saberes básicos*
A. Retos del mundo actual	- Objetivos de Desarrollo Sostenible. Emergencia climática y sostenibilidad. Relación entre factores naturales y antrópicos en la Tierra. Globalización, movimientos migratorios e interculturalidad. Los avances tecnológicos y la conciencia ecosocial. Conflictos ideológicos y etnoculturales. − Sociedad de la información. Búsqueda, tratamiento de la información, uso de datos en entornos digitales y evaluación y contraste de la fiabilidad de las fuentes. El problema de la desinformación. Uso específico del léxico relativo a los ámbitos histórico, artístico y geográfico − Cultura mediática. Técnicas y métodos de las Ciencias Sociales: análisis de textos, interpretación y elaboración de mapas, esquemas y síntesis, representación de gráficos e interpretación de imágenes a través de medios digitales accesibles. Tecnologías de la información geográfica. − Lo global y lo local. La investigación en Ciencias Sociales, el estudio multicausal y el análisis comparado del espacio natural, rural y urbano, su evolución y los retos del futuro. Análisis e interpretación de conceptos espaciales: localización, escala, conexión y proximidad espacial.
B. Sociedades y territorios.	− Interpretación del territorio y del paisaje. Del éxodo rural a la concentración urbana. El reto demográfico en España. El problema de la despoblación rural. Ordenación del territorio y transformación del espacio. La ciudad como espacio de convivencia. Importancia y cuidado del espacio público. La huella humana y la protección del medio natural.
C. Compromiso cívico local y global.	− Responsabilidad ecosocial. Compromiso y acción ante los Objetivos del Desarrollo Sostenible. La juventud como agente de cambio para el desarrollo sostenible. − Implicación en la defensa y protección del medio ambiente. Acción y posición ante la emergencia climática.

Dinámica de iniciación, instrucciones y materiales, información de procedimientos de evaluación

Se propuso la realización de una dinámica al inicio de les actividades con el objetivo de dar a conocer a los alumnos el proyecto, las instrucciones, los materiales disponibles y la información sobre procedimientos de evaluación. Se creó una tarea en Google Classroom donde se proporcionó a los alumnos un guion con las instrucciones del trabajo y su evaluación.

En el guion se especificaba que durante varias sesiones se trabajarían contenidos relacionados con los principales problemas ambientales, objetivos de desarrollo sostenible y medidas ambientales para hacer frente a los impactos. Se informó a los alumnos que debía realizar un póster sobre un problema ambiental

concreto a escoger entre cuatro (contaminación del agua, contaminación atmosférica, desforestación o sobreexplotación de recursos hídricos) y un ODS vinculado.

Se indicaban los materiales que debía utilizar el alumnado para llevar a cabo los trabajos, entre los cuales se aportaban datos estadísticos para la elaboración de un mapa con ArcGIS online (estado cuantitativo y cualitativo de las aguas subterráneas en los acuíferos de Mallorca, superficies afectadas por incendios forestales en las Baleares y emisiones de CO_2 y número de vehículos en cada una de las islas del archipiélago).

Se informó a los alumnos que el producto final del proyecto debía ser un póster en formato digital. Se proporcionó una plantilla para el póster en formato presentación de Google con la finalidad de orientar al alumnado, aunque se daba libertad para que pudieran presentar formatos originales.

Finalmente, se proporcionó a los alumnos información sobre el procedimiento de evaluación de las tareas. Se preveían dos métodos una escala analítica para evaluar el trabajo en clase (autoevaluación y coevaluación) y una rúbrica para evaluar el producto final.

Secuencia de tareas competenciales

El desarrollo de las actividades y contenidos se ajustó a las 4 fases del Ciclo de Kolb (Kolb y Fry, 1975). En primer lugar, se propuso que los alumnos partieran de una experiencia concreta, en nuestro caso se proporcionaron imágenes sobre la relación entre el hombre y naturaleza a lo largo de la historia, un texto sobre el cambio climático y mapas sobre la desertificación en España y sobre el estado de las masas de agua en Baleares. En segundo lugar, los alumnos debían reflexionar sobre las experiencias propuestas mediante trabajo cooperativo. En tercer lugar, a partir de la reflexión se debía realizar una conceptualización de los 4 problemas objeto de estudio (contaminación del agua, contaminación atmosférica, desforestación o sobreexplotación de recursos hídricos). Finalmente se procedía a experimentar lo aprendido mediante la realización del proyecto del póster, para el cual cada grupo debía escoger uno de los problemas ambientales estudiados. El póster como tal debía incluir tres aspectos básicos: las características del problema ambiental (debía incluir un mapa elaborado con ArcGIS online de las zonas afectadas en las Islas Baleares a partir de los datos proporcionados), el estudio de un ODS relacionado con el problema ambiental y un listado de medidas ambientales que pudieran contribuir a paliar sus efectos (Figura 1).

¿Por qué no es sostenible nuestro modelo de desarrollo? y ¿cuál debe ser el modelo de futuro?
EXPERIENCIA CONCRETA
❑ Imágenes, mapas, texto.
❑ 4 problemas ambientales: Contaminación del agua, de la atmósfera, desforestación y sobreexplotación de recursos hídricos
REFLEXIÓN
Rutinas de pensamiento en grupos (palabra, idea, frase; lectura compartida…)
CONCEPTUALIZACIÓN
Lista de impactos provocados por cada uno de los problemas y posibles medidas correctoras
EXPERIMENTACIÓN
Elaboración de un póster sobre un problema ambiental.
❑ Caracterización del problema y confección de un mapa (ArcGIS online)
❑ Trabajar un ODS vinculado al problema.
❑ Medidas ambientales
Evaluación
Se definen desempeños a partir de los criterios 1.3 y 3.1 (Anexo I del Real Decreto 217/2022)

Figura 1. Diagrama de síntesis del diseño de la situación de aprendizaje. Fuente: elaboración propia.

Para obtener el mapa los alumnos debían realizar las siguientes tareas utilizando unas instrucciones proporcionadas por el profesor: darse de alta como usuarios de la plataforma ArcGIS online, importar los datos del problema ambiental escogido en una tabla en formato "csv", localizar los datos a partir de un campo de direcciones o lugares, seleccionar el tipo de leyenda e imprimir un mapa con leyenda.

2.2. Fase análisis del diseño e implementación de la situación de aprendizaje

Los trabajos de diseño de la situación de aprendizaje nos permitieron analizar la adecuación del currículo de la LOMLOE para trabajar las TIG, así como para la implementación del trabajo con los ODS, en la asignatura de Geografía e Historia de 3º de la ESO.

Las actividades programadas se desarrollaron durante ocho sesiones de 55 minutos entre los meses de mayo y junio de 2022 y se entregaron finalmente 29 trabajos para su evaluación (recordar que el trabajo se realizó en grupos). Durante las sesiones y en la fase de evaluación posterior se pudo realizar un diagnóstico de la conveniencia del uso de las TIG en la asignatura de Geografía e Historia de la ESO. Se realizó un análisis de la aplicación ArcGIS online como Web SIG para el trabajo competencial en el aula, intentando discernir cuales eran las ventajas e inconvenientes de su uso a partir de la experiencia del profesor.

Precisamente, los dos puntos anteriores, adecuación al currículo de la LOMLOE y valoración del uso de las TIG, serán los temas tratados en el siguiente apartado de resultados del trabajo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente apartado se introducirán los resultados del trabajo, centrándonos en dos aspectos: ODS y TIG en el currículo de la LOMLOE y valoración del uso del ArcGIS online por parte de los alumnos.

3.1. Los ODS y las TIG en el currículo de la LOMLOE

A raíz del trabajo realizado en el diseño de la situación de aprendizaje se pueden hacer las siguientes argumentaciones con relación al currículum de la ESO y las ODS y las TIG. La LOMLOE, como vimos en apartados anteriores, pone el foco en el trabajo competencial, de manera que las competencias clave y específicas, junto con los criterios de evaluación, constituyen el eje central del currículum y de las situaciones de aprendizaje. Así en el currículum de la asignatura de Geografía e Historia de las ESO se establecen 9 competencias específicas que a su vez dan lugar a 21 criterios de evaluación para los cursos de 3º y 4º.

Entre las competencias específicas una tiene relación directa con los ODS, se trata de la competencia específica 3 que incide en la necesidad de dar a conocer los principales desafíos a los que se ha enfrentado y enfrenta la humanidad y realizar propuestas que contribuyan a un desarrollo sostenible. Esta competencia a su vez se concreta con el criterio de evaluación 3.1 que insta a conocer los ODS, realizando propuestas que contribuyan a su logro e incidiendo en el uso de mapas y otras representaciones gráficas. Además de la competencia y criterio indicados existen otras que indirectamente también facilitarían la aplicación y trabajo de los ODS en la asignatura de Geografía e Historia y para el 3º de la ESO, se trata de la competencia específica 4 relacionada con identificar y analizar los elementos del paisaje con el objeto de promover su conservación y uso sostenible, o los criterios 3.2, 4.1, 4.2 o la 9.2.

Si el trabajo con los ODS, uno de los dos temas centrales del trabajo, se encuentra claramente recogido entre las competencias específicas y los criterios de evaluación del currículum, no ocurre lo mismo con el otro tema de estudio, las TIG. En ninguna de las competencias específicas de la asignatura de Geografía e Historia existe referencia alguna al trabajo con nuevas tecnologías aplicadas al análisis geográfico, ni incluso referencia a mapas o cartografía. De hecho, tampoco se recoge ninguna competencia que pudiera asimilarse a lo que muchos autores reclaman como competencia espacial, la habilidad de representar, generar, recordar y transformar información simbólica no lingüística, mapear, ser capaz de leer, comprender y utilizar un plano o un mapa, para poder orientarse en el espacio (Gómez-Trigueros, 2020). En cuanto a los criterios de evaluación tampoco existen referencias al uso o manejo de las TIG, aunque sí que puede identificarse una sola referencia al uso de mapas, la ya indicada en el criterio 3.1, que relaciona ODS con el uso de mapas. Éste es un criterio de evaluación que podría ser usado en una gran variedad de situaciones de aprendizaje, ya que los ODS pueden ser aplicados en cualquier ámbito de la asignatura.

Los saberes básicos tienen un peso inferior en el currículum y se estructuran en bloques y conjuntos saberes. En la asignatura de Geografía e Historia, para los cursos de 3º y 4º los saberes básicos se organizan en tres bloques: los retos del mundo actual (vinculado principalmente con la geografía) sociedades y territorios (vinculado principalmente con la historia) y el compromiso cívico local y global. En cada uno de estos bloques se relacionan conjuntos de saberes, a veces con contenidos muy variados.

Uno de esos conjuntos de saberes, dentro del bloque de retos del mundo actual, lleva por título Objetivos de Desarrollo Sostenible, y dentro de él se incluyen saberes tan diversos como emergencia climática, sostenibilidad, relación entre factores naturales y antrópicos en la Tierra, globalización, movimientos migratorios e interculturalidad, avances tecnológicos y conciencia ecosocial, conflictos ideológicos y etnoculturales.

En el bloque de retos del mundo actual y dentro de un conjunto de saberes con el título de cultura mediática aparece una referencia a las Tecnologías de la Información Geográfica junto a otras técnicas como por ejemplo la interpretación y elaboración de mapas. Es la única referencia en todo el currículum a las TIG, referencia muy periférica y completamente descontextualizada.

3.2. Valoración del uso de la Web SIG, ArcGIS online, en los trabajos

Una de las actividades propuestas dentro del proyecto era la confección de un mapa de las islas Baleares o de Mallorca sobre el problema ambiental escogido mediante el uso de las TIG. La finalidad de esta parte del trabajo era la de evaluar la conveniencia del uso de las TIG en la asignatura de Geografía e Historia de 3º. Para ello se trabajó con una Web SIG, el ArcGIS online que permite construir mapas en la web utilizando datos propios y creando una cuenta de forma gratuita. La experiencia del uso de las TIG en un aula de ESO nos ha brindado elementos ventajosos y no tan ventajosos que merecen ser compartidos.

La disponibilidad cada vez mayor de infraestructuras informáticas adecuadas en los centros escolares permite afrontar con mayores garantías proyectos como el nuestro. El hecho de disponer de los equipos necesarios y una buena conexión wifi son elementos esenciales para poder trabajar en plataformas online y con información geográfica. En nuestro caso y en líneas generales los resultados fueron positivos, aun así, los equipos a pesar de ser suficientes presentaron dificultades puntuales para poder trabajar con agilidad con datos geográficos.

La disponibilidad de plataformas Web SIG, como el ArcGIS Online permiten un acceso universal a herramientas SIG de manera libre y gratuita, siempre que se disponga de un buen acceso a internet y equipos suficientes. A diferencia del software SIG extremadamente caro y solo accesible en las grandes corporaciones. Las utilidades disponibles en ArcGIS online son limitadas, pero suficientes para poder realizar este tipo de trabajos: añadir datos mediante archivos de hojas de cálculo, localizar estos datos mediante un campo de direcciones o lugares, seleccionar tipo de leyenda (cantidades por tamaño, cantidades por color, mapa de calor, símbolo único o tipos en símbolos únicos) e imprimir mapas con leyenda sencillos que se pueden descargar como imagen (Figura 2). Como inconveniente hay que mencionar que las Web SIG, ArcGIS Online en nuestro caso, aún son demasiado complejas y poco intuitivas para hacer más amigable su uso en adolescentes. Creemos que el acceso a las diferentes utilidades requiere de un mayor grado de interactividad, especialmente en lo referido al diseño y encuadre del mapa a imprimir o en el diseño de las leyendas. Además, para trabajar con datos geográficos a escala local, tal como demanda el trabajo con ODS, se nos presentaron algunas dificultades a la hora de reconocer los topónimos para geolocalizar los datos.

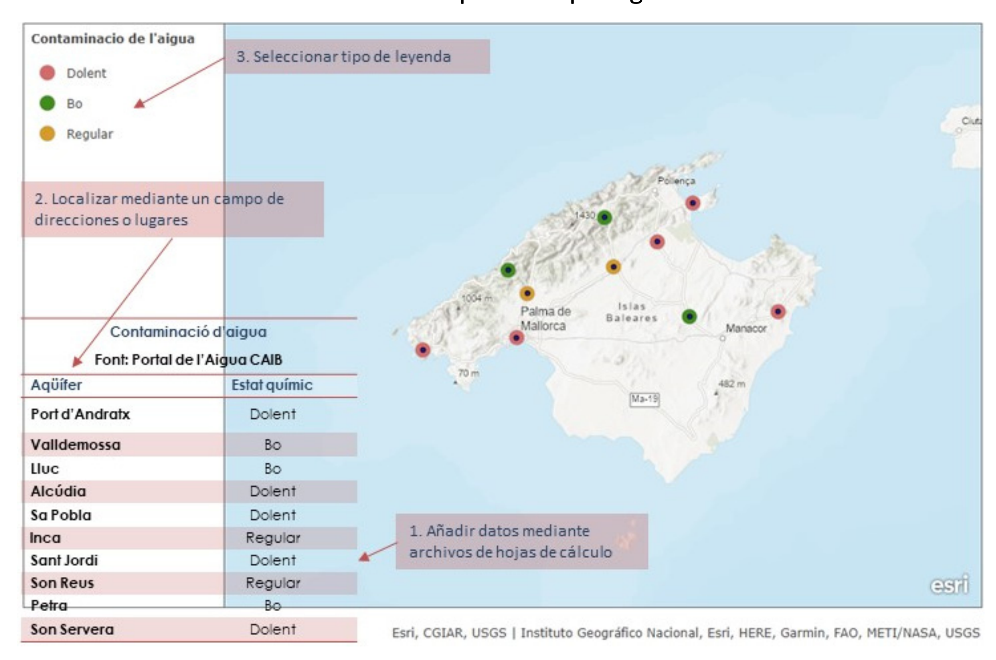


Figura 2. Ejemplo de mapa elaborado con ArcGIS Online. Estado de contaminación de los acuíferos en Mallorca. Fuente: elaboración propia a partir de IBESTAT.

El uso de las TIG favoreció el aprendizaje competencial por parte del alumnado que pudo conocer de cerca el trabajo con mapas y nuevas tecnologías propios de la geografía moderna. Los resultados, de los cuales se muestran algunos ejemplos (Figura 3), fueron positivos. El 89,6% de los trabajos entregados consiguieron presentar un mapa elaborado en ArcGIS online utilizando las instrucciones entregadas al inicio de las tareas, lo cual plantea la posibilidad de realizar más trabajos de este tipo y ampliar incluso los desempeños. A pesar de ello, un 31% de los trabajos entregados optaron por editar la leyenda utilizando otros programas, ante las dificultades que se les presentaban, y hasta un 38% de los trabajos editaron el diseño final del mapa

utilizando otro programa, con el fin de mejorar la presentación final (Tabla 3).

Una última consideración sobre el uso de las TIG en los institutos se nos plantea en lo referido a la formación del profesorado y a su desconocimiento de las herramientas. Muchos profesores que imparten la asignatura de Geografía e Historia en los institutos no tienen formación en TIG, lo cual es un escollo para poder llevar a cabo proyectos de este tipo y más aún cuando en el currículum oficial no se le da la importancia que se merece y en los libros de texto no se trabaja. Aún así hay que reconocer que la formación actual de los graduados en Geografía, que sí que tienen bastantes asignaturas de TIG, puede abrir en el futuro oportunidades en el uso de estas herramientas.



Figura 3. Ejemplos de pósteres elaborados por los alumnos. Fuente: elaboración propia a partir de trabajos de los alumnos.

Tabla 3. Resultados del uso de ArcGIS online en el aula. Tareas programadas y número de trabajos que las desarrollaron. Fuente: elaboración propia

Tareas	*Nº de trabajos*	*%*
Darse de alta como usuarios de la plataforma ArcGIS online	26	89,7
Importar tabla de datos "csv"	26	89,7
Localizar datos a partir de un campo de direcciones o lugares	26	89,7
Edición de la leyenda	20	69,0
Diseño de impresión del mapa	18	62,1
Total de trabajos	*29*	*100*

4. CONCLUSIONES

El nuevo marco curricular definido por la LOMLOE permite el diseño de situaciones de aprendizaje en las que se trabajen los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 y las Tecnologías de la Información Geográfica en la asignatura de Geografía e Historia de 3º curso de la ESO. La LOMLOE pone el foco en el trabajo competencial y existen en el currículum competencias específicas y criterios de evaluación para trabajar directamente con los ODS. La geografía, como ciencia que estudia la relación entre actividad humana y medio ambiente, se convierte en una materia clave para el trabajo de los ODS y así dar respuesta a los retos ambientales actuales. En cambio, en el currículum no existen ni competencias específicas ni criterios de evaluación que propongan el trabajo directo con las TIG, a pesar de la importancia que tienen estas técnicas para el conocimiento geográfico. Así pues, para poder desarrollar estos saberes es necesario ajustarse a criterios de evaluación indirectos que casualmente uno de ellos coincide con el criterio vinculado a las ODS.

El resultado del trabajo nos permite confirmar también que las TIG pueden ser herramientas adecuadas para la enseñanza de las competencias relacionadas con el espacio en la educación secundaria obligatoria. La mejora de las infraestructuras informáticas en los centros educativos de las últimas décadas y la disponibilidad de aplicaciones como las Web SIG, permiten afrontar proyectos como el actual con garantía.

5. BIBLIOGRAFÍA

Bailey, P. (1981). *Didáctica de la geografía*. Bogotá: Cincel.

Bouzo, I. (2016). Aplicación de la metodología del aprendizaje geográfico por descubrimiento basado en SIG en proyectos didácticos para 2º de bachillerato. En R. Sevastiá Alcaraz y E. Tonda Monllor, *La investigación e innovación en la enseñanza de la geografía* (págs. 477-489). Alicante: Universidad de Alicante.

de Làzaro, M. L. y González, M. J. (2005). La utilidad de los Sistemas de Información Geográfica para la enseñanza de la Geografía. *Didáctica geográfica,* 7, 105-122. Obtenido de https://didacticageografica.age-geografia.es//index.php/didacticageografica/article/view/213

de Miguel González, R. (2013). Aprendizaje por descubrimiento, enseñanza activa y geoinformación: hacia una didáctica de la geografía innovadora. *Didáctica Geográfica,* 14, 17-36. Obtenido de https://didacticageografica.age-geografia.es/index.php/didacticageografica/article/view/230

García Pérez, F. (2017). Algunas reflexiones sobre la trayectoria de la enseñanza de las Ciencias Sociales en las útimas décadas*. Revista Digital de Educación y Formación del Profesorado,* 14, 280-292. Obtenido de https://hdl.handle.net/11441/98004

Gómez-Trigueros, I. M. (2020). Geolocalizando con TAC: la competencia digital docente y la competencia espacial con TPACK. *Revista de Estudios Andaluces,* 40. doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2020.i40

González, R. (2018). Geografía y tiempo contemporáneo: educación geográficay enseñanza de las ciencias sociales para el mundo global. *Revista de investigación en didáctica de las ciencias sociales*, 2, 36-54. doi: https://doi.org/10.17398/2531-0968.02.36

Granados, J. y Medir, R. M. (2021). *Enseñar y aprender geografía para un mundo sostenible*. Barcelona: Octaedro S.L.

Gryl, I, Jekel, T. y Donert, K. (2010). GI & Spatial Citizenship. En T. Jekel, A. Koller, K. Donert y R. Volger, *Learning with GI V* (págs. 2-11). Berlin: Wichmann.

Kolb, D. A. y Fry, R. (1975). Toward an applied theory of experiential learning. En C. Cooper, *Theories of Group Process*. London: John Wiley.

Kolvoord, B. (2012). Integrating geospatial technologies and secondary student projects: the geospatial semester. *Didáctica Geográfica,* 13, 57-67. Obtenido de https://didacticageografica.age-geografia.es/index.php/didacticageografica/article/view/96

Lara Fuillerat, J. y Moraga Campos, J. (2018). Percepción del alumnado del IES "El Tablero" (Córdoba) sobre la Enseñanza y el aprendizaje de la Geografía. *Didáctica Geográfica,* 19, 149-167. doi: https://doi.org/10.21138/DG.420

Llorente-Adán, J. (2021). Propuestas de trabajo con los ODS en Ciencias Sociales y Geografía de Secundaria y Bachillerato. En J. Granados y R. M. Medir: *Enseñar y aprender geografía para un mundo sostenible* (págs. 55-68). Barcelona: Octaedro, S.L.

Macía, X., Rodríguez, F. y Armas, F. (2017). Cartografía temática y recursos TIC en la senseñanza y apredizaje de la Geografía regional de Europa. *Revista de investigación en didáctica de las ciencias sociales*, 1, 71-85. doi: https://doi.org/10.17398/2531-0968.01.71

Marrón, M. (2011). Educación geográfica y formación del profesorado. Desafíos y perspectivas en el nuevo Espacio Europeo de Educación Superior. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles,* 57, 313-341. Obtenido de https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/1386

Nieto, G. y Siegmund, A. (2019). Análisis de la práctica educativa con sistemas de información geográfica a través de la perspectiva de los profesores en Baden-Württemberg, Alemania. *Didáctica Geográfica,* 20, 259-264. doi: https://doi.org/10.21138/DG.459

ONU. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Obtenido de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible.

Real Decreto 217/2022, de 29 de marzo, por el que se establece la ordenación y las enseñanzas mínimas de la Educación Secundaria Obligatoria. (30 de 03 de 2022). *BOE*. Obtenido de https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/03/29/217/con

Sebastián-López, M. y de Miguel-González, R. (2017). Educación geográfica 2020: IBERPRIX y Collector for ARCGIS como recursos didácticos para el aprendizaje del espacio. *Didáctica Geográfica,* 18, 231-246. Obtenido de https://didacticageografica.age-geografia.es/index.php/didacticageografica/article/view/402

Souto González, J. (1998). *Didáctica de la Geografía*. Barcelona: Ediciones del Serbal.



J. de la Riva, M.T. Lamelas, R. Montorio, F. Pérez-Cabello, M. Rodrigues (Eds.) 2022
Actas del XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica
TIG al servicio de los ODS
Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, ISBN: 978-84-18321-49-8

pp. 669-678

El cambio climático en las aulas de Secundaria utilizando las Tecnologías de Información Geográfica como herramienta de aprendizaje

J. Velilla Gil[1], C. Guallart Moreno[2], M. Laguna Marín-Yaseli[3]

[1] *IES El Portillo. C. Juan XXII, 3. 50010 Zaragoza.*
[2] *Departamento Didácticas Específicas, Facultad de Educación. Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna,12, 50009 Zaragoza.*
[3] *Colegio del Salvador. C. Padre Arrupe, 13. 50009 Zaragoza.*

jvelillagil@gmail.com, cguallart@unizar.es, mlaguna@jesuitaszaragoza.es

RESUMEN: El próximo curso escolar, los alumnos y profesores de 1.º y 3.er curso de ESO se van a encontrar con numerosas modificaciones que trae consigo la Ley Orgánica de Modificación de la LOE (LOMLOE), recientemente aprobada. Entre ellos se encuentran los que afectan a los contenidos curriculares y las metodologías que se tienen que implementar en las aulas. Uno de los contenidos básicos de la asignatura Geografía e Historia de tercer curso de Secundaria Obligatoria es el relacionado con el cambio climático y el desarrollo sostenible. La ley incluye, como aprendizajes esenciales, las competencias específicas de área que identifican las actuaciones asociadas a determinadas capacidades que el alumno debe poder desplegar en actividades de aprendizaje en torno a los contenidos o saberes básicos. En esta comunicación presentamos unos recursos educativos para trabajar en el aula el cambio climático utilizando las Tecnologías de Información Geográfica. Estos recursos se presentan en dos formatos: los que explican los conceptos básicos esenciales y aquellos que reúnen el conjunto de actividades que, utilizando los primeros, procuran tres tipos de aprendizaje: adquisición de destrezas (conocer comprender y analizar el territorio), desarrollo del pensamiento crítico, creatividad y resolución de problemas y, finalmente, la profundización en los conceptos aplicados en las tareas desarrolladas.

Palabras-clave: cambio climático, aprendizaje competencial, currículo bimodal, ArcGIS Online.

1. INTRODUCCIÓN

En esta comunicación son presentados un conjunto de materiales educativos para ser utilizados en las asignaturas de Geografía e Historia (ESO) y de Geografía (Bachillerato). Los autores, al confeccionar estos materiales, han pretendido crear un modelo para llevar a cabo procesos de aprendizaje competenciales en la línea que el Consejo de la Unión Europea establece en las Recomendaciones de 22 de mayo de 2018:

"Facilitar la adquisición de las competencias clave haciendo uso de las buenas prácticas... En especial, mediante la promoción de diversos planteamientos y entornos de aprendizaje, incluido el uso adecuado de las tecnologías digitales, en contextos de educación, formación y aprendizaje".

Esto es, un modelo de aprendizaje sobre unos contenidos que se puedan utilizar dentro del marco curricular, pero que pongan el acento en los aprendizajes de competencias y en la utilización de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), especialmente de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG). Para hacerlo, siguiendo la terminología del Real Decreto 217/2022, de 29 de marzo, por el que se establece la ordenación y las enseñanzas mínimas de la Educación Secundaria Obligatoria (BOE núm. 76, de 30 de marzo de 2022, páginas 41571 a 41789) y del Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato (BOE núm. 82, de 06/04/2022) se han establecido unos "saberes básicos", que giran sobre los conceptos de "cambio climático" y de "desarrollo sostenible", y de unas "competencias específicas" articuladas en torno al uso y las destrezas asociadas con el "pensamiento geográfico", definido como "un conjunto de habilidades para analizar, comprender y transformar el conocimiento del espacio en torno a conceptos como proximidad, conexión, localización o distribución espacial, utilizando la escala adecuada en cada caso, desde lo local a lo global" (Anexo II del RD 217/2022).

Para conseguir la adquisición de esas competencias por los alumnos trabajando esos contenidos se adoptaron unas "estrategias didácticas", que parten del modelo pedagógico del llamado currículo bimodal (Marqués y Álvarez, 2014) con la intención de conseguir los objetivos que dibuja, en el Considerando número 7, la Recomendación del Consejo de la Unión Europea: "En la economía del conocimiento, memorizar hechos y procedimientos es clave, aunque no suficiente para el progreso y el éxito. Las capacidades, como la resolución de problemas, el pensamiento crítico, la habilidad para cooperar, la creatividad, el pensamiento computacional o la autorregulación, son más esenciales que nunca en nuestra sociedad en rápido cambio. Se trata de herramientas para lograr que lo que se ha aprendido funcione en tiempo real, para generar nuevas ideas, nuevas teorías, nuevos productos y nuevos conocimientos".

Los materiales se organizan en seis capítulos: el calentamiento global, los climas actuales y previstos, cambio climático y consecuencias en las aguas marinas, cambio climático y cambios en los usos de los suelos, cambio climático e impactos en la distribución de la población, y cambio climático y movimientos migratorios (el caso de la Europa mediterránea y el África septentrional). Por los contenidos conceptuales tratados y por las herramientas que se ofrecen para trabajarlos, El "cambio climático" se ha convertido en un concepto básico desde el que se articulan gran parte de los conocimientos y aprendizajes de los currículos de geografía.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1. El tema: "el cambio climático"

La elección de este tema para nuestros materiales educativos se ha basado, principalmente, en dos factores: su relevancia geográfica y la publicación del "Quinto Informe de Evaluación" del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de 2014.

La relevancia geográfica y social comenzó cuando el cambio climático empezó a formar parte, asociado al interés por los problemas medioambientales y el desarrollo de la Ecología, de los problemas abordados por la Geografía en los años sesenta del pasado siglo XX, esa incorporación fue como tema de debate entre quienes afirmaban su existencia y los peligros que suponía y quienes la rebatían, bien argumentando la existencia de oscilaciones climáticas, fundamentalmente en las temperaturas, en épocas históricas anteriores, bien rebajando los riesgos que se le asignaban. Es entre 1992, fecha del Convenio Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, y 1997, cuando se firmó el Protocolo de Kioto, en el que 84 países se comprometieron a reducir sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), cuando el cambio climático y cómo hacerle frente se convirtieron en un problema relevante de la Geografía y en motivo de preocupación para amplios sectores de la población. Los problemas devenidos de las dificultades para cumplir lo acordado en ese Protocolo y para dar continuidad a los acuerdos de reducción de emisiones contaminantes, incrementaron el interés por el tema. Así, la citada Recomendación afirma que los Estados miembros de la UE deben "incorporar las ambiciones de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, en especial dentro del objetivo 4.7, en la educación, la formación y el aprendizaje, incluso intensificando la adquisición de conocimientos relativos a la limitación de la naturaleza polifacética del cambio climático y utilizando recursos naturales de un modo sostenible". Así, el nuevo currículo educativo español (RD 217/2022) establece, entre los diez retos para la educación en el siglo XXI: "desarrollar una actitud responsable a partir de la toma de conciencia de la degradación del medioambiente y del maltrato animal basada en el conocimiento de las causas que los provocan, agravan o mejoran, desde una visión sistémica, tanto local como global", lo que se vincula con la necesidad de desarrollar la llamada Educación para el Desarrollo Sostenible (EDS), que no es sino la formación en esas competencias que lo hacen posible (Boulahrouz, 2018). En este punto, parece conveniente observar que el currículo español se refiere al "cambio climático" de diferentes maneras, las más frecuentes son "emergencia climática" y "crisis climática", formas estas que parecen poner el acento en la peligrosidad de la situación y no en la comprensión de esa situación y la identificación de las causas del "cambio climático".

La publicación, en 2014, del "Quinto Informe de Evaluación" del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), que realizó una actualización en la evaluación del cambio climático observado y proyectado para períodos de tiempo y escenarios previsibles o niveles de forzamiento radiativo. Esa actualización supuso cambios en el diseño de esos escenarios y en las proyecciones temporales para las consecuencias de estos. La primera modificación es que los nuevos escenarios no se plantean como itinerarios que conducen a ciertas situaciones, como lo que es necesario hacer o cambiar para llegar a ciertos niveles en el cambio climático. Los escenarios de Trayectoria de Concentración Representativa (RCP) describen las probables trayectorias de los niveles de forzamiento radiativo, pero no parten de lo que conducirá a que esos niveles sean más altos o más bajos, dejando esa "causalidad" para otro tipo de estudios. Así, el escenario 2.6

es el que ese forzamiento reduce su ritmo de crecimiento en el primer cuarto del siglo XXI, se estabiliza entre 2025 y 2050, comenzando a declinar desde mediados del siglo, aunque sin recuperar las cifras anteriores al año 2000, la anomalía térmica no superará los 2 º C; el 4.5 sitúa esa estabilización entre 2050 y 2070, aumentando las cifras (aunque a un ritmo decreciente) posteriormente, la anomalía térmica probablemente superará los 2ºC; el 6 comienza reducir el ritmo de crecimiento de sus cifras en el último cuarto del siglo XXI, pero continúan creciendo después, la anomalía térmica seguramente superará los 2ºC; y el 8.5 mantiene en todo el siglo el mismo ritmo de crecimiento y la anomalía térmica superará los 2ºC, pero probablemente esté por debajo de los 4ºC. Junto a estas formas de evaluar el cambio climático, en 2021, el Sexto Informe de Evaluación del IPCC ha introducido nuevos cambios: a los escenarios RCP ha añadido, pero no sustituido, las Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP) escenarios basados en las diferencias regionales en crecimiento demográfico, económico, en las emisiones de GEI, en las mejoras en educación, el grado de urbanización y el desarrollo tecnológico. Estos escenarios SSP describen las situaciones en este conjunto de criterios son contexto para los escenarios RPC (SSP1 para RCP 1.9; ssp2 para RCP 2.6; SSP3 para RCP 4.5; SSP4 para RCP7; y SSP5 para RCP 8.5). Como en los escenarios RCP, estos otros no pretenden ser guía o establecer itinerarios para cambios económicos frente al calentamiento global. Simplemente constatan las condiciones en las que se dan los diferentes escenarios, condiciones que no dependen de la voluntad de los agentes sociales, económicos y políticos, sino que son el resultado de las respuestas de las diferentes sociedades a los problemas del contexto en el que viven.

El Sexto Informe del IPCC vino acompañado de la publicación en Internet del Atlas Interactivo del Grupo de Trabajo I del IPCC en que se ofrece una abundante cartografía sobre los resultados ofrecidos en el Informe. Estos mapas se ofrecen en un visor y bajo una licencia Creative Commons Attribution CC BY 4.0, en formatos descargables. También se pueden descargar a través del repositorio “Atlas GitHub”. Este atlas, además de poner a disposición una cartografía de calidad, que hasta la fecha no existía, está teniendo repercusiones en el mundo educativo ya que es muy versátil y permite obtener datos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (GMIP) en sus fases 5 y 6, de diferentes modelos históricos, de plataformas de observación climatológica, como CRU TS, HadCRUT5 o Berkeley Earth, y también datos de paleoclimatología, como el Proyecto de Intercomparación de Modelado Paleoclimático (PMIP), en sus fases 3 y 4. Estos datos se ofrecen a partir de tablas de variables, de escenarios RCP y SSP y de horizontes temporales. También es versátil para poder cartografiar datos globales y regionales (subcontinentales). Estos cambios y la aparición de esta cartografía han facilitado un incremento de la relevancia del tema del “cambio climático” en los currículos y actividades educativas y una mejoría notable en la calidad de estas.

2.2. La educación como formación en competencias

En el Considerando 4 de la Recomendación del Consejo de la UE ya citado, se indica que, en la actualidad, han cambiado los requisitos en materia de competencias, ya que cada vez son más los puestos de trabajo que han sido automatizados, las tecnologías tienen una mayor relevancia en todos los ámbitos del trabajo y de la vida, y las competencias emprendedoras, sociales y cívicas cobran más importancia para poder asegurar la resiliencia y la capacidad para adaptarse al cambio. Y en el Anexo de dicha Recomendación queda establecido que las competencias clave son las que constituyen el esqueleto de los procesos educativos de éxito, definidas como una combinación de conocimientos, capacidades y actitudes, en las que los conocimientos se componen de hechos y cifras, conceptos, ideas y teorías que ya están establecidos y apoyan la comprensión de un área o tema concretos; las capacidades se definen como la habilidad para realizar procesos y utilizar los conocimientos existentes para obtener resultados; y las actitudes describen la mentalidad y la disposición para actuar o reaccionar ante las ideas, las personas o las situaciones. En la misma línea se expresa el RD 217/2022, cuando describe el pensamiento geográfico como un conjunto de habilidades para analizar, comprender y transformar el conocimiento del espacio en torno a conceptos como proximidad, conexión, localización o distribución espacial, utilizando la escala adecuada en cada caso, desde lo local a lo global. En lo esencial, de esa descripción se deducen estas competencias específicas de aprender Geografía:

- Utilizar herramientas digitales o no, para buscar, seleccionar, tratar y organizar información objetiva, relevante y pertinente, para adquirir e incorporar datos en la creación de contenidos y saberes.
- Indagar, argumentar y elaborar proposiciones propias sobre problemas geográficos que resulten relevantes en la actualidad en el contexto en el que se desarrolla la vida del estudiante, tanto en la escala local como en la global.

- Interesarse por los principales problemas y retos que afectan a la humanidad, interesándose por las diferentes percepciones que se reflejan en los medios de comunicación. Esta competencia encuentra su medio más adecuado en la realización de aprendizajes a través de proyectos, retos o problemas que hagan posible que el alumnado, tanto individualmente como en equipo, ponga en acción estrategias y habilidades diversas para analizar y comprender los fenómenos, situaciones o acontecimientos que tienen una especial relevancia o interés en el mundo en el que vive. Este modo de aprendizaje otorga también al alumnado el protagonismo en la construcción del conocimiento, lo que implementa destrezas y competencias relacionadas con aprender a aprender, autoestima, y la autonomía personal.
- Identificar y analizar los elementos que conforman el territorio, tanto el local como el global. Esta competencia implica también la toma de conciencia acerca de la gravedad de las consecuencias de la crisis climática y la exigencia de adoptar conductas respetuosas con la dignidad de todos los seres vivos, tendente a asegurar un desarrollo sostenible. Debe además promover posturas activas y de participación con respecto a la mejora, en general, del entorno, tanto a escala local como global, y en favor de un reparto justo, equitativo y solidario de los recursos en un sentido global.

Estas competencias generales relacionadas con aprender Geografía se concretan en los materiales educativos presentados en:

- Aprender los conocimientos y las destrezas necesarias para promover el desarrollo sostenible, entre otras cosas mediante la Educación para el Desarrollo Sostenible (EDS) (Programa de acción mundial para la Educación para el Desarrollo Sostenible de la UNESCO y Boulahrouz, 2018), hilvanándose con la concreción en la preocupación por los efectos del cambio climático, que se concretan en los saberes básicos relacionados con la emergencia climática de esta forma: “elementos y factores que condicionan el clima y el impacto de las actividades humanas. Métodos de recogida de datos meteorológicos e interpretación de gráficos. Riesgos y catástrofes climáticas en el presente, en el pasado y en el futuro. Vulnerabilidad, prevención y resiliencia de la población ante las catástrofes naturales y los efectos del cambio climático
- Familiarizarse en el uso de los medios digitales, tanto para buscar información y tratarla, como para analizarla geográficamente y cartografiarla con las herramientas de las TIG. Estas herramientas aparecen en los currículos de ESO y Bachillerato como instrumentos competenciales que forman parte de los saberes básicos (RD 217/2022) con enunciados como este: “elementos y factores que condicionan el clima y el impacto de las actividades humanas. Métodos de recogida de datos meteorológicos e interpretación de gráficos. Riesgos y catástrofes climáticas en el presente, en el pasado y en el futuro. Vulnerabilidad, prevención y resiliencia de la población ante las catástrofes naturales y los efectos del cambio climático”, que forman parte de los contenidos y estrategias de aprendizaje utilizados en los materiales que presentamos.

2.3. Modelo pedagógico y estrategias didácticas

El modelo pedagógico que hemos adoptado para diseñar los materiales educativos ha sido el currículo bimodal, que se plantea como objetivo “la actualización de las estrategias didácticas para adecuarlas al contexto de la sociedad de la información y la digitalización” (Marqués y Álvarez, 2014), evaluando su éxito a partir de la calidad de los aprendizajes realizados, medida a partir de los conocimientos y las capacidades aprendidas. Para ello, se plantea la diferenciación de los dos componentes básicos de los aprendizajes. Por un lado, los conceptos o conocimientos esenciales que posibilitan leer, comprender, analizar, etc. los “saberes básicos” con los que, en cada asignatura y también de forma transversal se van a realizar las tareas de aprendizaje. Sin estos conceptos es imposible avanzar en los aprendizajes; por otro lado, las tareas asociadas al saber hacer, desde las que se avanza en la adquisición de destrezas, realizando aprendizajes eficientes con herramientas adecuadas. Estas destrezas entroncan directamente con las competencias que antes hemos definido.

Esto nos ha llevado a elaborar unos materiales educativos que presentan dos formatos:

- Los que explican los conceptos básicos esenciales, tanto los que se consideran propios de una rama del saber, en este caso la geografía, como aquellos que actúan de forma transversal y conforman el armazón epistemológico de varias ramas. Esta transversalidad es evidente en el caso de la geografía y sus enlaces con la historia, la biología, la geología, la economía, etc. Además, la competencia en lectoescritura, imprescindible para los aprendizajes geográficos, requiere de conceptos básicos de matemáticas, química,

informática, física, etc. sin los cuales no puede llevarse a cabo la aprehensión de datos e información, que se expresan en terminología y magnitudes de esas disciplinas, y no se puede olvidar que el objeto de estudio de la Geografía es el territorio entendido como un espacio resultado de las interrelaciones entre los elementos naturales que lo conforman y las interrelaciones con las sociedades humanas. En resumen, el establecimiento de los conceptos "geográficos" no puede quedarse sólo en sus saberes básicos de los currículos oficiales, debe además atender a aquellos otros que actúan de forma transversal (Binkley et al., 2012).

- Un conjunto de actividades o saber hacer en las que, utilizando los conceptos básicos implicados en ellas, los alumnos llevan a cabo tareas que les aportan tres tipos de aprendizaje: por un lado, adquirir destrezas para, en este caso, conocer, comprender y analizar el territorio, que son competencias vinculadas con la Geografía; por otro, avanzar en sus habilidades en pensamiento crítico, resolución de problemas, trabajo en equipo, capacidades de comunicación, destrezas analíticas, creatividad y evaluación de la sostenibilidad de las intervenciones humanas; por último, avanzar en la comprensión de los conceptos aplicados en las tareas, aplicación que ha puesto de manifiesto su capacidad para explicar y resolver el problema planteado. El modelo de actividades que plantea el currículo bimodal es el realizado por proyectos y por resolución de problemas o casos, aunque también ocupan su lugar el aprendizaje servicio y otras formas que ponen el acento en la cooperación y la resolución de problemas.

La importancia que el currículo bimodal asigna a estas actividades como generadoras de destrezas y como elementos que implementan la comprensión conceptual, se observa en este texto de Marqués y Álvarez, 2014, p. 153: "El enfoque del currículo bimodal prescribe que los alumnos siempre podrán realizar estas actividades prácticas con apoyo de su «memoria auxiliar», es decir, consultando sus apuntes, libros e Internet. El profesor decidirá en cada caso qué fuentes de información se pueden utilizar. El objetivo es que los estudiantes se acostumbren a trabajar contando con estos apoyos (apuntes, libros, Internet y otras herramientas TIC), que estarán a su disposición cuando sean adultos". El aprendizaje por proyectos, problemas o casos es la estrategia didáctica coherente con los nuevos modos de entender el aprendizaje y el desarrollo autónomo de la personalidad de los ciudadanos contemporáneos. (Vergara, 2015, pág. 1617)

2.4. La utilización de las TIG con finalidad educativa

En el currículo de Geografía de ESO, Las TIG se plantean como herramientas para hacer frente a los retos del mundo actual. Así, se identifican los objetivos para los aprendizajes geográficos de esta manera: "ubicación espacial: representación del espacio, orientación y escalas. Utilización de recursos digitales e interpretación y elaboración de mapas, esquemas, imágenes y representaciones gráficas. Tecnologías de la Información Geográfica (TIG)", donde se plantea la conveniencia del uso de las TIG con fines cartográficos, pero es en el currículo de Bachillerato cuando se le asignan más funciones y más importancia: "La geografía, por su naturaleza práctica, permite al alumnado desenvolverse en el uso responsable de las tecnologías de la información y la comunicación gracias a las funcionalidades de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG). Las TIG, además de constituir un recurso básico para desarrollar investigaciones individuales y en equipo, permiten plantear el tratamiento interdisciplinar del territorio y, como herramienta de diagnóstico, presentar y comunicar eficientemente conclusiones y propuestas de mejora en el entorno social del alumnado desde su análisis crítico, fomentando su madurez y participación cívica. La aplicabilidad de la materia de Geografía la convierte en una disciplina clave de la sociedad del conocimiento y del emprendimiento social". La utilización de las TIG en nuestros materiales parte de estos planteamientos, aunque matizándolos. La elaboración cartográfica con estas tecnologías por parte de los alumnos, a nuestro modo de ver, plantea la necesidad de dos aclaraciones:

- Los alumnos de ESO son capaces de elaborar sencillos mapas con ese software (Kolvoord, 2012), pero esas tareas pueden perder su interés educativo si tienen como objetivo el aprendizaje de este, en lugar de su uso para conseguir aprendizajes geográficos competenciales. Esto es, no se trata de trabajar en TIG, sino de hacerlo con TIG (Ramos, 2010). El resultado de esa "mala práctica" suele ser que, en lugar de utilizar el SIG para aprender geografía, el aprendizaje del manejo de esas tecnologías sustituye a los geográficos (Buzo, 2017).
- Las TIG y sus tecnologías asociadas (Sistemas de Información Geográfica, Fotointerpretación, Teledetección, etc.), utilizadas en Educación Secundaria, son herramientas para enseñar y aprender, y deben ponerse al servicio de unas estrategias y unos objetivos educativos (Kerski, 2003 y De Miguel, 2015), que

entiendan los procesos de aprendizaje como itinerarios de construcción del conocimiento en los que es capital la participación del alumno (Buzo, 2016).

Las TIG, además de ofrecer una visión del espacio actual y mucho más rica que la que ofrece la cartografía tradicional, ofrecen una distribución de la información en capas, es decir, cada información relevante aparece diferenciada y la relación con otras informaciones no se realiza por acumulación, como sucede en gran parte de la cartografía que se viene utilizando en los materiales escolares tradicionales, sino a partir de su distribución espacial. Del análisis de esas distribuciones espaciales se obtienen las interrelaciones que mantienen entre sí; esto es, las relaciones de multicausalidad. Así, el uso de las TIG en educación da un salto hacia delante en las formas de aprender: tienen la capacidad de poner de manifiesto los elementos que configuran el territorio y cómo lo hacen, haciendo que el conocimiento geográfico, además de generador de competencia en análisis geográfico, sea más objetivo y accesible, y permita la identificación de los factores de la sostenibilidad de las acciones antrópicas, que ahora son consideradas factores conformadoras del territorio.

La utilización de las TIG en la elaboración de los materiales educativos que presentamos se ha basado en esos criterios, pretendiendo que:

- El profesorado que los utilice enseñe mejor, evitando la tradición memorística, generando relaciones interactivas con su alumnado en el desarrollo de su itinerario formativo, y dando lugar a aprendizajes competenciales en el campo de la geografía, pero también, de forma transversal, en otras asignaturas.
- El alumnado utilizando las TIG aprende su funcionamiento, a identificar los elementos que conforman y determinan los espacios geográficos y sus interrelaciones, que son entendidas como factores de causalidad, y a evaluar la sostenibilidad de esas relaciones.

Los materiales se han realizado utilizando la plataforma de ArcGIS Online a través de la Cuenta Colegios que ESRIEspaña proporciona de forma totalmente gratuita a los centros escolares que la solicitan. Esta CuentaColegios es una cuenta de organización en la que el centro puede incluir hasta 2000 usuarios y desde la que se tiene acceso a un gran número de recursos para ayudar a los estudiantes a aprender y entender la geografía empleando los SIG. Los formatos más utilizados son:

- *WebMap*: se trata de una visualización interactiva de información geográfica que contiene un mapa base y un conjunto de capas de datos, muchos de los cuales incluyen ventanas emergentes interactivas con información sobre los datos. Ejemplos: https://arcg.is/iuPPy y https://arcg.is/1iK9De.
- Configurable Apps: gran variedad de plantillas para interactuar con los Mapas Web y datos de la organización sin modificar su contenido. Las más utilizadas son: Visor Básico, Visor de Adjuntos, Visor de Imágenes, etc. Ejemplos: visores: https://arcg.is/4znPP, https://arcg.is/1PKCbb; aplicación básica: https://arcg.is/0qWHPj0; comparación de mapas o capas: https://arcg.is/1HHezb.
- *StoryMaps*: permite desarrollar una unidad temática combinando texto narrativo con contenido multimedia. Ver ejemplos en 3.1. Temas y organización.
- *Web AppBuilder*: se crea una aplicación a partir de un WebMap con varias capas al que se le incorporan varios widgets para llevar a cabo sencillos análisis territoriales. En: https://arcg.is/Hiyuz0 y https://bit.ly/3zlAz4e.
- Aplicaciones móviles: con las que se pueden capturar datos fiables en el campo que son automáticamente trasladas a un WebMap. Las más adecuadas son Collector for ArcGIS y Survey123.

3. LOS MATERIALES DIDÁCTICOS

3.1. Temas y organización

Los materiales abordan el tema del cambio climático de forma global (exceptuando la sección sexta, que pone el foco en la Europa mediterránea y África septentrional) y sus causas y repercusiones a través de seis secciones, a las que se accede desde enlaces ubicados en la primera (también se puede hacer desde sus Uniform Resource Locators (URL). Los contenidos de cada sección se abordan a partir de la utilización de mapas, aplicaciones SIG, imágenes, textos, vídeos, gráficos, gráficos, etc.

Primera sección. Calentamiento global. Conceptos y causas.

Comienza con una pequeña introducción para familiarizar a los alumnos con los conceptos claves de la fenomenología del cambio climático: anomalía en las temperaturas, el volumen de las precipitaciones, la cantidad de días consecutivos sin llover, la evaporación, etc. o aumento de la frecuencia y la intensidad de las olas de calor o de frío, frecuentes lluvias torrenciales, sequías más largas, desertificación, etc. A continuación, se constata la existencia de otros cambios climáticos (situaciones anormalmente cálidas o frías) desde el origen de la Tierra, estudiados en paleoclimatología, pero sólo el actual obedece a la acción contaminadora antrópica emisora de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera y puede ser irreversible. Para facilitar el trabajo con documentos sobre el cambio climático actual se plantea la existencia del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), y del significado de términos como "escenarios", "horizontes temporales" o "forzamiento radiativo". Por último, se abordan los conceptos de contaminación, sus agentes y sus fuentes. Se encuentra en: https://arcg.is/0XbKHn1.

Segunda sección. Cambios en los climas del mundo

Reconocidos los cambios en temperaturas y precipitaciones, se pasa a identificar cómo han repercutido en los climas del mundo. Para ello, se utiliza la clasificación de KöppenGeiger adecuándola a la edad y etapa educativa del alumnado y a los contenidos curriculares oficiales. Tras caracterizar cada uno de esos climas, se compara su distribución territorial en 19502007, 19802016 y 20712100 y la de las anomalías antedichas para poder identificar las relaciones de causalidad que las unen. Por último, se abordan los acuerdos internacionales para luchar contra el cambio climático, el papel de la Unión Europea en esa lucha y las formas de combatirlo surgidas en la sociedad civil y en la vida cotidiana. En https://arcg.is/0PPSbi1.

Tercera sección. Cambio climático y sus repercusiones en los océanos.

Trata sobre las repercusiones del cambio climático en la circulación de las aguas oceánicas (corrientes marinas, vientos, Circulación de Vuelco Meridional del Atlántico), y en las consecuencias que esas repercusiones tienen en los cambios del nivel del mar, en las temperaturas del agua de los océanos, y en su acidificación. A continuación, se abordan los impactos que el cambio climático están teniendo en los ecosistemas marinos y en las actividades humanas, los recursos alimenticios, etc. En: https://arcg.is/0jqyCn.

Cuarta sección. El cambio climático y cambios en los usos del suelo.

Comienza por identificar los usos principales que se hacen del suelo (adaptación de la clasificación Corine Land Cover) y el reparto de los mismos en la actualidad (1960 a 2019). A continuación, se analizan los cambios producidos en la distribución territorial de los usos del suelo y su relación con la de las anomalías que configuran el cambio climático. En el siguiente apartado, se trabaja la expansión y distribución de la degradación que está ocurriendo en los suelos cultivables asociada a procesos de empobrecimiento, erosión, aumento de su aridez, desertificación y salinización. La sección concluye abordando dos temas: la deforestación y la pérdida de la capacidad de los ecosistemas terrestres, de los que forman parte los suelos, para almacenar carbono, restándolo a la atmósfera. En https://arcg.is/0C09i1.

Quinta sección. El cambio climático y sus repercusiones en el reparto de la población.

El punto de partida es el reparto de la población en la actualidad: densidad de población (utilizando dos modelos para representarla: el número de habitantes por unidad espacial y el "nicho climático humano"), Tasa de Crecimiento Real, Tasas Brutas de Natalidad y Mortalidad. A continuación, se identifican los cambios que en ese reparto va a producir el cambio climático en el horizonte temporal de 2070, según los escenarios previstos, pero poniendo el acento en el más pesimista, el 8.5. La causalidad de esos cambios se asocia a los conceptos de inseguridad alimentaria y vulnerabilidad (capacidad de hacer frente a los problemas derivados de situaciones de extrema pobreza, desigual reparto del ingreso, tanto en el interior de los países como entre ellos), que en la sección tercera ya se habían tratado. Por último, se analizan las consecuencias que el cambio climático está teniendo y va a tener sobre la altura del nivel del mar. En: https://arcg.is/1nniyq3.

Sexta sección. El cambio climático y los movimientos migratorios. Estudio de un caso: Europa mediterránea y África septentrional.

Focalizando el territorio en el que se va a trabajar, se ofrecen herramientas para analizar: sus climas y los cambios en los mismos que se están produciendo y se producirán, la distribución de los usos del suelo actual y las modificaciones ya ocurridas y las previstas para los próximos años, la importancia de las actividades agrarias para sus economías y sociedades, las anomalías en precipitaciones y temperaturas que se asocian con una mayor frecuencia e intensidad de las sequías y en la salud de la vegetación. De los resultados

de estos análisis, relacionándolos, se puede obtener como conclusión un aumento en la vulnerabilidad de buena parte de la población, que habita en los territorios más áridos, con suelos más empobrecidos y en riesgo de desertificación, para enfrentarse a la inseguridad alimentaria, la desnutrición, la enfermedad y el hambre. Situación que implementa las corrientes emigratorias, tanto hacia otros países como hacia otros territorios del mismo país. En: https://arcg.is/0y1TPS.

Al final, se pide un informe escrito o en forma de vídeo en el que con imágenes obtenidas de los materiales trabajados se responda a estas cuestiones:

- ¿Cómo afecta el cambio climático en las economías de las sociedades estudiadas?
- ¿Cómo lo hace en sus vidas?
- ¿Qué relaciones se dan entre cambio climático y sequías?
- ¿Qué consecuencias tienen las sequías en los habitantes de estas regiones?
- ¿Pueden hacer frente a esas consecuencias?
- ¿Qué significa "vulnerabilidad"?
- ¿Qué relaciones encuentras entre la ocurrencia de sequías y los movimientos migratorios?

Todos estos materiales se ofrecen al profesorado y al alumnado de forma pública y con alta adaptabilidad, ya que pueden optar por:

- Utilizar un mapa o varios para resolver un problema geográfico, bien de los planteados en los materiales, bien de los que profesores o alumnos quieran plantear.
- Utilizar una, varias o todas las aplicaciones para trabajar en la resolución de los problemas planteados en ellas con las herramientas que se ofrecen en las mismas.
- Utilizar los agrupamientos de los materiales en secciones y apartados para elegir los materiales que se quieren trabajar.
- Trabajar con todo el contenido o la mayor parte de él, haciendo del cambio climático y los aprendizajes relacionados el núcleo clave organizador de los contenidos de un trimestre o un curso entero.

4. EXPERIMENTACIÓN DE LOS MATERIALES Y CONCLUSIONES

4.1. Experimentación de los materiales

Los materiales se acabaron de confeccionar en el mes de mayo de 2022 lo que ha ocasionado que en el momento en el que se escribe esta comunicación no haya podido realizarse una experimentación de los mismos, que se ha demorado para el comienzo del próximo curso académico 20222023, que coincidirá con la aplicación del currículo LOMLOE en 1º y 3º de la ESO.

No obstante, la experiencia acumulada en los últimos años elaborando recursos de estas características (Atlas Digital Escolar; Los procesos de despoblación en Aragón; Patrimonio cultural y despoblación, entre otros) así como las numerosas experiencias de aula, recogidas en la web Aprender con Mapas, llevada a cabo de forma individual en los respectivos centros donde hemos trabajado los autores de esta comunicación, nos dan la certeza de que el camino emprendido para la renovación de la enseñanza de la Geografía permite no sólo desarrollar en los alumnos las competencias de base geográfica, sino también las digitales, en general, así como las relacionadas con el tratamiento de la información que permitirán que los alumnos y alumnas de esta etapa educativa desarrollen un pensamiento espacial que les permita abordar los problemas geográficos a los que la sociedad en su conjunto va a tener que enfrentarse en los próximos años.

4.2. Conclusiones

La experiencia mencionada anteriormente en la elaboración y utilización de este tipo de materiales nos permite presentar las siguientes conclusiones:

- Los materiales tienen una calidad científica muy adecuada, aunque quizá quepa la posibilidad de reducir algo el volumen de los conceptos manejados. Es conveniente revisar la programación de estos para seleccionar aquellos conceptos clave más relevantes y con más capacidad organizadora en el conjunto de los conocimientos manejados.

- El uso de las TIG propuesto es adecuado para las edades y etapas escolares a los que van dirigidos. Por otro lado, su utilización en las aulas tiene bastante potencial para generar aprendizajes competenciales, tanto en las habilidades y destrezas asociadas con la Geografía como aquellas otras que, de una manera y otra, trabajan con conceptos que se relacionan con el territorio.

En la experimentación que se desea realizar en el próximo curso escolar se contará con una rúbrica de evaluación basada en Binkley et al. (2012), donde se evalúan:

- Destrezas relacionadas con el pensamiento, como creatividad e innovación, pensamiento crítico y aprender a aprender.
- Destrezas relacionadas con el saber hacer, como comunicación, colaboración, manejo de herramientas de trabajo, manejo de la información y destrezas TIC.
- Destrezas ciudadanas, como vida y estudios, percepción de la propia personalidad y de sus actitudes, y responsabilidad social.

Se pretenderá evaluar si la utilización con cierta intensidad de los materiales da lugar a una mayor cantidad y calidad de los aprendizajes curriculares que cuando se utilizan otro tipo de materiales y otros modelos y estrategias didácticas. Por ello, se hará una evaluación de la situación previa a su utilización y otra evaluación después de su empleo. Queda pues pendiente esa experimentación en las aulas y las posibles mejoras en los materiales que pueden devenir de ella.

5. BIBLIOGRAFÍA

Binkley, M., Erstad, O., Herman, J., Raizen, S., Ripley, M., MillerRicci M. y Rumble, M. (2012). Defining TwentyFirst Century Skills. En P. Griffin, B. McGaw y E. Care (eds.), *Assessment and Teaching of 21st Century Skills* (1766). Springer.

Boulahrouz Lahmidi, M. (2018). *Aprendizaje móvil y ciudadanía espacial en la educación para el desarrollo sostenible. Una propuesta para enseñanza de las ciencias sociales en educación secundaria obligatoria* [Tesis doctoral, Universidad de Girona]. EArchivo: http://hdl.handle.net/10803/620791

Buzo Sánchez, I. (2016). Aplicación de la Metodología del Aprendizaje Geográfico por descubrimiento basado en SIG en proyectos didácticos para 2º de Bachillerato. En R. Sebastiá, y E.M. Tonda (eds.), *La investigación e innovación en la enseñanza de la Geografía* (pp. 477489). Publications de la Universitat d´Alacant.

Buzo Sánchez, I. (2017). De las TIG a las TAG: integrando la información en el aprendizaje Geográfico. En R. Sebastiá y E.M. Tonda (coord.), *Enseñanza y aprendizaje de la geografía para el siglo XXI* (pp. 175200). Publications de la Universitat d´Alacant.

Consejo de la Unión Europea, (2018). *Recomendación del Consejo, de 22 de mayo de 2018, relativa a las competencias clave para el aprendizaje permanente*, Diario Oficial de la Unión Europea, 2018/C 189/01,

De Miguel González, R. (2015). Del pensamiento espacial al conocimiento geográfico a través del aprendizaje activo con tecnologías de la información geográfica. *Revista Geografía do Colégio Pedro II*, 2(4), pp713.

Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato (BOE núm. 82, de 06/04/2022).

Gutiérrez, JM, Jones, R.G., Narisma, G.T., Alves, L.M., Amjad, M., Gorodetskaya, I.V., Grose, M., Klutse, N.A.B., Krakovska, S., Li, J., Martínez Castro, D., Mearns, L.O., Mernild, S.H., Ngo, T. y van den Hurk, B. (2021). Atlas. En *Cambio Climático 2021: La Base de la Ciencia Física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático* [MassonDelmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, SL Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L.Goldfarb, MI Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, JBR Matthews, TKMaycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (eds.)].

IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L.A. Meyer (eds)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. IPCC, Geneva, Switzerland.

IPCC (2022). *IPCC WGI Interactive Atlas*, url: https://interactiveatlas.ipcc.ch/

Iturbide, M., Fernández, J., Gutiérrez, J.M., Bedia, J., Cimadevilla, E., DíezSierra, J., Manzanas, R., Casanueva, A., Baño Medina, J., Milovac, J., Herrera, S., Cofiño, A.S., San Martín, D., García Díez, M., Hauser, M., Huard, D., Yelekci, Ö. (2021). *Repositorio que respalda la implementación de los principios FAIR en el Atlas IPCCWG1*. Zenodo, DOI: 10.5281/zenodo.3691645. Disponible en: https://github.com/IPCCWG1/Atlas

Kerski, J.J. (2003). The implementation and Effectiveness of Geographic Information Systems Technology and Methods in Secondary Education. *Journal of Geography,* 102, pp. 128137. National Council for Geographic Education.

Kolvoord, B. (2012). Integrating geospatial technologies and secondary student projects: the geospatial semester. *Didáctica Geográfica*, 13, pp. 5767. Grupo de Didáctica de la Geografía (AGE).

Marqués Graells, P. y Álvarez Cánovas, I. (2014). *El currículo bimodal como marco metodológico para la evaluación: principios básicos y mejoras obtenidas en aprendizajes y rendimientos de los estudiantes*. Educar, 50(1), pp. 149166. Universidad Autónoma de Barcelona. https://www.raco.cat/index.php/Educar/article/view/287072.

Ramos, D.R. (coord.) (2010). *Los Sistemas de Información Geográfica en la Educación Secundaria*, Wanceulen Educación.

Real Decreto 217/2022, de 29 de marzo, por el que se establece la ordenación y las enseñanzas mínimas de la Educación Secundaria Obligatoria (BOE núm. 76, de 30 de marzo de 2022, páginas 41571 a 41789).

Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato (BOE núm. 82, de 06/04/2022).

Unesco (2020). *Educación para el desarrollo sostenible*. París. Descargado de: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000374896)

Vergara Ramírez, J.J. (2015). *Aprendo porque quiero. El Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), paso a paso,* Editorial SM.

XIX Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica

Zaragoza, 2022
12 al 14 de septiembre

Patrocinan











Colaboran

















Facultad de
Filosofía y Letras
Universidad Zaragoza

Organizan



Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad Zaragoza

